

Estudio comparativo de las plataformas SimPowerSystems de Matlab y Twin Builder de ANSYS para el modelado y control de un convertidor trifásico Back-to-Back NPC de 3 niveles

Triana-González, D. G.¹; Lara-Cardoso, J.²; Hernández-Flores, C.¹; Arjona-López, M. A.¹

Datos de Adscripción:

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, TNM Instituto Tecnológico de La Laguna, Blvd. Revolución y Av. Instituto Tecnológico de La Laguna, C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México.

² Tecnológico Nacional de México Campus Lerdo, Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Av. Tecnológico No. 1555 Sur, Periférico Gómez - Lerdo Km. 14.5, C.P. 35150, Lerdo, Durango, México.

Resumen – Este artículo presenta un estudio comparativo de *SimPowerSystems* y *Twin Builder* para modelar y controlar un convertidor trifásico de 3 niveles (3N) con una topología B2B (*Back-to-Back* - Espalda con Espalda) NPC (*Neutral Point Clamped* - Conectado al Punto Neutro). Este convertidor es muy utilizado en los sistemas de conversión de energía eólica para llevar a cabo tareas de control y de regulación del flujo bidireccional de potencia. Por lo que es importante seleccionar la plataforma más viable en que ellos se modelarán y simularán. *Twin Builder* es capaz de simular sistemas multifísica muy complejos, pero su modelado tan detallado hace demasiado lentas las simulaciones y requiere un mayor poder de cómputo. Por el contrario, *SimPowerSystems* es más transparente en sus librerías y cuenta con más información de soporte. La simplificación de sus modelos permite simularlos en menos tiempo y con una mayor facilidad, pero a costa de una menor precisión. A partir de pruebas exhaustivas se llevó a cabo un estudio cuantitativo y cualitativo de las ventajas e inconvenientes de ambas plataformas. Éstas se validaron y evaluaron al regular la potencia activa y reactiva de las fuentes de las redes trifásicas conectadas a cada lado del convertidor, así como para mantener constante el voltaje del bus de CD (Corriente Directa). El control del convertidor multinivel B2B NPC se realizó en el marco de referencia síncrono dq . Los resultados obtenidos y el análisis de las características de las plataformas muestran que la mejor solución es una co-simulación del sistema con ambos programas, sumando así las fortalezas de cada uno y contrarrestando sus limitantes.

Palabras Clave – Convertidor Espalda con Espalda, *SimPowerSystems* de MATLAB, Topología Multinivel NPC, *Twin Builder* de ANSYS.

Abstract – This article presents a comparative study of *SimPowerSystems* and *Twin Builder* to model and control a three-phase 3-level converter with a B2B NPC topology. This converter is widely used in wind energy conversion systems to carry out control and regulation tasks of the bidirectional power flow. Hence, it is important to select the most suitable platform in which they will be modeled and simulated. *Twin Builder* is capable of simulating very complex multiphysics systems, but its highly detailed modeling makes simulations too slow and requires a higher computing power. In contrast, *SimPowerSystems* is more transparent in its libraries and it has more support information. The simplification of their models allows them to be simulated in less time and with

greater ease, but at the cost of lower precision. From exhaustive tests, a quantitative and qualitative study of the advantages and inconvenients of both platforms is presented. These were validated and evaluated when regulating the active and reactive power of the three-phase grid sources connected to each side of the converter, as well as to keep constant the DC (Direct Current) bus voltage. The control of the B2B NPC multilevel converter was performed in the synchronous reference frame dq . The obtained results and the analysis of the characteristics of the platforms show that the best solution is a co-simulation of the system with both programs, thus adding the strengths of each one and counteracting their limitations.

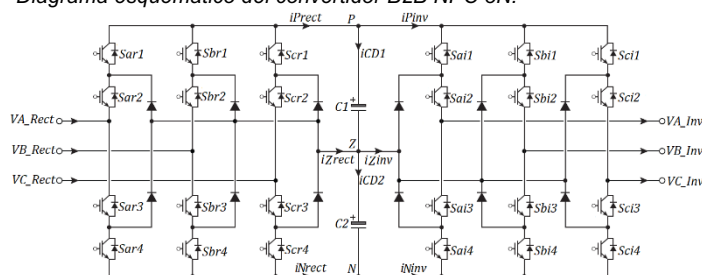
Keywords - ANSYS *Twin Builder*, *Back-to-Back Converter*, MATLAB *SimPowerSystems*, NPC Multilevel Topology.

I. INTRODUCCIÓN

El convertidor electrónico de potencia con topología B2B tiene las ventajas de contar con un único bus de CD, además de permitir un flujo bidireccional de energía y poder alcanzar una baja distorsión armónica en la corriente alterna (CA) de entrada (Zhang, 2008). El convertidor B2B NPC 3N es el convertidor más utilizado en aplicaciones de media y alta potencia por su superioridad en la reducción armónicos (Xu, 2020).

En la Figura 1 se muestra el diagrama esquemático del convertidor B2B NPC de 3 niveles.

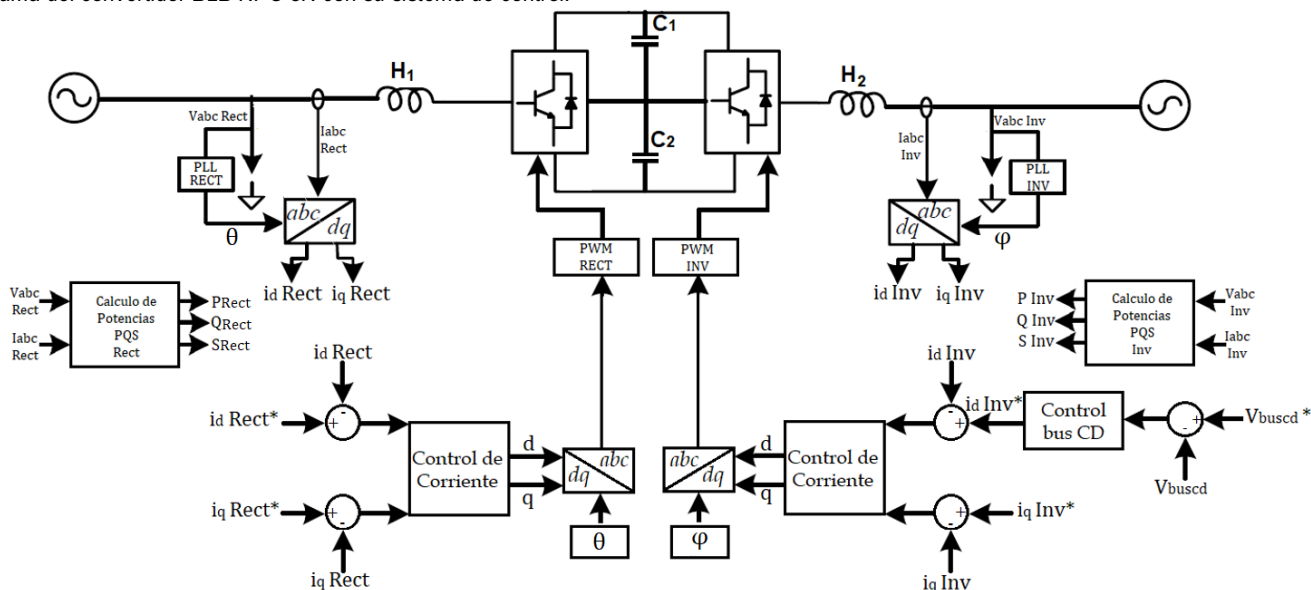
Figura 1
Diagrama esquemático del convertidor B2B NPC 3N.



El convertidor B2B NPC 3N se utiliza en aplicaciones de energía renovable por las ventajas que tiene respecto los convertidores de dos niveles, e.g., la capacidad de trabajar con voltajes y potencias más elevadas, así como superar los altos estándares relacionados con la calidad de la energía de la red (Bueno, 2008). Además, con esta configuración es posible controlar la potencia reactiva a ambos lados del convertidor (Li, 2012). Sin embargo, también tiene las desventajas de presentar el fenómeno desbalance de voltaje en sus capacitores y de contar con un alto número de componentes, así como de requerir técnicas control y modulación más complejas (Portillo, 2006).

Figura 2

Diagrama del convertidor B2B NPC 3N con su sistema de control.



La ventaja de un convertidor B2B de 3 niveles sobre un B2B de 5 niveles es un menor número de componentes (Zhang, 2018). Por lo tanto, la configuración B2B NPC 3N es muy utilizada en aplicaciones de energía eólica (Li, 2018).

Las herramientas de *SimPowerSystems* de MATLAB y *Twin Builder* de ANSYS son plataformas de simulación que permiten diseñar, probar, evaluar y diagnosticar una variedad muy amplia de sistemas, e.g., electrónicos, eléctricos y mecatrónicos.

Twin Builder se utiliza en aplicaciones donde existe una sólida integración de componentes, como motores, sensores y actuadores con sus controles electrónicos. También permite simular las interacciones entre estos componentes pues su flujo de diseño incorpora análisis térmico y mecánico para evaluar por ejemplo estrategias de enfriamiento, y analizar efectos mecánicos críticos como ruido, vibración y dureza de los componentes. Con esta plataforma es posible por ejemplo predecir el rendimiento térmico, así como limitar el ruido acústico, la vibración y las pérdidas en los generadores eléctricos (Bashir, 2022), (Biancolini, 2020).

SimPowerSystems ofrece una amplia librería de componentes que permiten modelar y simular sistemas complejos. Además, incluye modelos ya preprogramados de convertidores, motores y sistemas completos de energía renovable, lo que simplifica el trabajo para lograr simular los modelos propios. También permite evaluar sistemas de transmisión eléctrica y analizar la generación, la conversión y el consumo de energía en una red eléctrica (Simscape Electrical, 2023).

Así, el objetivo de este trabajo de investigación es realizar un estudio comparativo de estas dos plataformas para modelar y controlar un convertidor B2B NPC 3N mediante la técnica de control vectorial (Beg, 2016).

El presente artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección II se describe el convertidor B2B NPC 3N y su implementación en ambas plataformas. En la sección III se muestran y discuten los resultados obtenidos en ambos programas. Finalmente, en la sección IV se presentan las conclusiones.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

En la Figura 2, se muestra el esquema general del convertidor B2B NPC 3N junto con el sistema de control empleado en la simulación para realizar el estudio comparativo. Este convertidor está compuesto de 24 IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor* - Transistor Bipolar de Compuerta Aislada), 12 diodos conectados al punto neutro, y 2 capacitores en el bus de CD.

En el diagrama se observa como el convertidor está conectado mediante inductores de acoplamiento a dos redes eléctricas: una del lado del rectificador y la otra del lado del inversor (Samanes, 2020). También se identifican los bloques de control de las corrientes en el marco de referencia *dq*. En el lado inversor se realiza el control del bus de CD mediante una técnica de modulación PWM (*Pulse Width Modulation* - Modulación de Ancho del Pulso) aplicada a los interruptores IGBT.

Para llevar a cabo el estudio comparativo, se implementó en ambas plataformas el circuito completo mostrado en la Figura 2, incluyendo el convertidor, las redes y el control, así como el cálculo de las potencias activa, reactiva y aparente. Tanto *SimPowerSystems* de MATLAB como *Twin Builder* de ANSYS cuentan con componentes y bloques similares para modelar el convertidor.

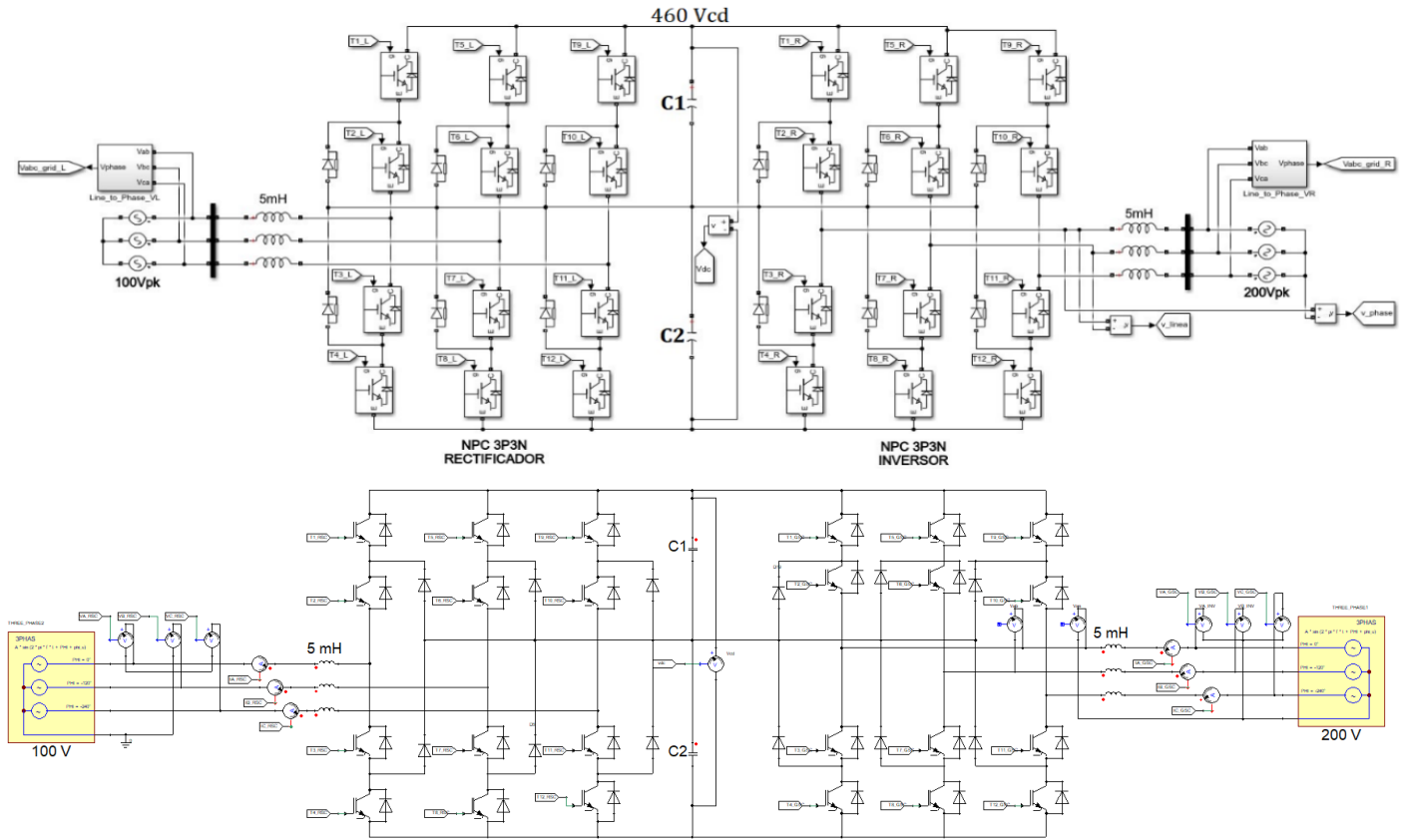
En el lado del rectificador las corrientes de referencia se fijaron a 10 A en *d* y 0 A en *q*. Del lado del inversor, la referencia de corriente en *q* también se fijó a 0 A, mientras que la referencia en *d* la proporciona la salida del controlador que regula el voltaje del bus de CD a una referencia de 460 V.

Los voltajes de CA a las salidas del rectificador y del inversor se obtienen de (1) y (2), respectivamente (Yamasu, 2017):

$$\begin{bmatrix} V_{a_{rect}} \\ V_{b_{rect}} \\ V_{c_{rect}} \end{bmatrix} = V_{C1} \begin{bmatrix} S_{ar1} \\ S_{br1} \\ S_{cr1} \end{bmatrix} + V_{C2} \begin{bmatrix} S_{ar2} \\ S_{br2} \\ S_{cr2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{a_{inv}} \\ V_{b_{inv}} \\ V_{c_{inv}} \end{bmatrix} = V_{C1} \begin{bmatrix} S_{ai1} \\ S_{bi1} \\ S_{ci1} \end{bmatrix} + V_{C2} \begin{bmatrix} S_{ai2} \\ S_{bi2} \\ S_{ci2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Figura 3
Circuito del convertidor B2B NPC 3N: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.



En la Figura 3 se muestran los convertidores B2B NPC 3N simulados en *SimPowerSystems* y en *Twin Builder*. Obsérvese como ambos lados en cada convertidor comparten el mismo bus de CD. La corriente i_Z (neutro) de los capacitores de división y las corrientes i_P (positivo) e i_N (negativo) en el bus de CD mostradas en la Figura 1 se obtienen en términos de las corrientes i_{abc} de cada red y de los estados S de conmutación del convertidor como (Yaramasu, 2017):

$$\begin{bmatrix} i_{P_{rect}} \\ i_{Z_{rect}} \\ i_{N_{rect}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ar1}S_{ar2} & S_{br1}S_{br2} & S_{cr1}S_{cr2} \\ S_{ar2}S_{ar3} & S_{br2}S_{br3} & S_{cr2}S_{cr3} \\ S_{ar3}S_{ar4} & S_{br3}S_{br4} & S_{cr3}S_{cr4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a_{rect}} \\ i_{b_{rect}} \\ i_{c_{rect}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{P_{inv}} \\ i_{Z_{inv}} \\ i_{N_{inv}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ai1}S_{ai2} & S_{bi1}S_{bi2} & S_{ci1}S_{ci2} \\ S_{ai2}S_{ai3} & S_{bi2}S_{bi3} & S_{ci2}S_{ci3} \\ S_{ai3}S_{ai4} & S_{bi3}S_{bi4} & S_{ci3}S_{ci4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a_{inv}} \\ i_{b_{inv}} \\ i_{c_{inv}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Tabla 1
Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor	Unidad
Tamaño de paso de la simulación	1	μs
Frecuencia de la red	60	Hz
Frecuencia de conmutación	10800	Hz
Voltaje del bus de CD	460	V
Voltaje de la red CA - lado rectificador	100	V
Voltaje de la red CA - lado inversor	200	V
Inductancias	5	mH
Capacitores del bus de CD	4	mF

A partir de (3) se derivan las corrientes del lado del rectificador, mientras que con (4) se obtienen las corrientes del lado del inversor.

A cada lado del convertidor B2B NPC 3N se conectó una fuente trifásica, la cual tiene un voltaje de 100 V en el lado rectificador y de 200 V en el lado inversor.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros con los cuales se realizó la simulación del sistema en ambas plataformas.

Las Figuras 4 y 5 muestran los esquemas de control de las corrientes dq tanto en el lado rectificador como en el lado inversor.

Figura 4
Control lado rectificador: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.

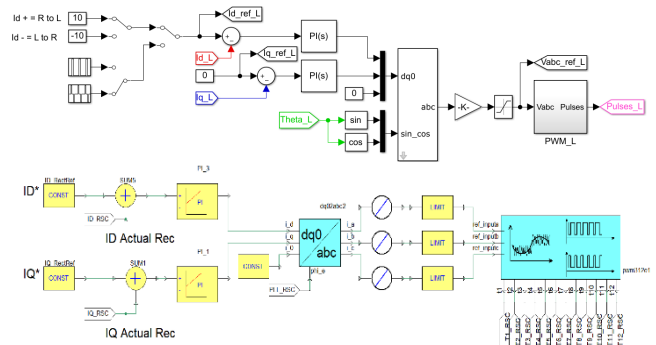
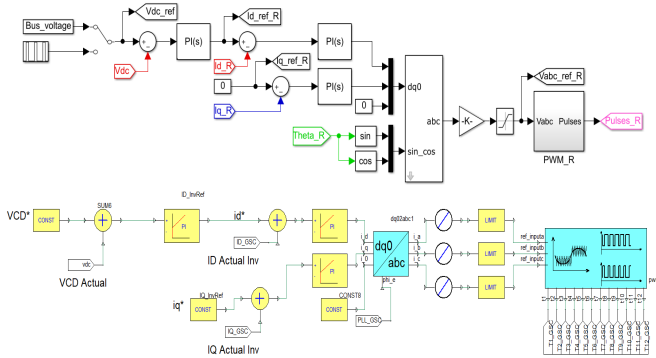


Figura 5
Control lado inversor. (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.



Los controladores PI (proporcional-integral) utilizados tienen como propósito reducir a cero en estado permanente el error $e(t)$ entre el valor de referencia y el valor medido. La ecuación de este controlador lineal se expresa como (Mazzone, 2002):

$$y(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt \quad (5)$$

donde k_p y k_i son las ganancias proporcional e integral, respectivamente.

Los PLL (*Phase Locked Loop* - Lazo Enganchado en Fase) son utilizados en los modelos de simulación para identificar la fase de las redes eléctricas (Naderi, 2020).

La Figura 6 muestra el diagrama del PLL utilizado en ambas plataformas, mientras que la Tabla 2 presenta las ganancias de todos controladores PI incluidos en el sistema. Los controladores de corriente en d y q son iguales para cada lado del convertidor.

La Tabla 3 muestra los estados de conmutación del convertidor B2B NPC de 3 niveles. Obsérvese que hay 27 diferentes combinaciones, las cuales generan 18 distintos vectores de voltaje de salida. Los valores 0, 1 y 2 en la secuencia

Figura 6
Esquema del PLL utilizado en el sistema: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.

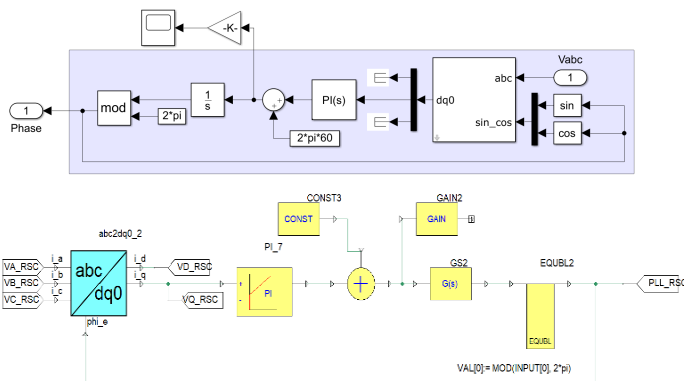


Tabla 2
Ganancias de los controladores implementados.

Parámetro	Símbolo	k_p	k_i
PI de corriente del rectificador	PI_Rect	200	800
PI de corriente del inversor	PI_Inv	50	200
PI de voltaje del bus de CD	PI_Vcd	1	40
PI del PLL del rectificador	PI_PLL_Rect	10	5
PI del PLL del inversor	PI_PLL_Inv	10	5

Tabla 3
Estados de conmutación del convertidor B2B NPC de 3 niveles.

#	Vector de Voltaje	Secuencia de Conmutación			Interrupidores Superiores					
		S_a	S_b	S_c	$S_{a,1}$	$S_{a,2}$	$S_{b,1}$	$S_{b,2}$	$S_{c,1}$	$S_{c,2}$
1	V_0	[0 0 0]	0	0	0	0	0	0	0	0
2	V_0	[1 1 1]	0	1	0	1	0	1	0	1
3	V_0	[2 2 2]	1	1	1	1	1	1	1	1
4	V_1	[1 0 0]	0	1	0	0	0	0	0	0
5	V_1	[2 1 1]	1	1	0	1	0	1	0	1
6	V_2	[1 1 0]	0	1	0	1	0	1	0	0
7	V_2	[2 2 1]	1	1	1	1	0	1	0	1
8	V_3	[0 1 0]	0	0	0	1	0	0	0	0
9	V_3	[1 2 1]	0	1	1	1	0	1	0	1
10	V_4	[0 1 1]	0	0	0	1	0	1	0	1
11	V_4	[1 2 2]	0	1	1	1	1	1	1	1
12	V_5	[0 0 1]	0	0	0	0	0	0	0	1
13	V_5	[1 1 2]	0	1	0	1	1	1	1	1
14	V_6	[1 0 1]	0	1	0	0	0	0	0	1
15	V_6	[2 1 2]	1	1	0	1	1	1	1	1
16	V_7	[2 0 0]	1	1	1	0	0	0	0	0
17	V_8	[2 1 0]	1	1	0	1	0	0	0	0
18	V_9	[2 2 0]	1	1	1	1	0	0	0	0
19	V_{10}	[1 2 0]	0	1	1	1	0	0	0	0
20	V_{11}	[0 2 0]	0	0	1	1	0	0	0	0
21	V_{12}	[0 2 1]	0	0	1	1	0	1	0	1
22	V_{13}	[0 2 2]	0	0	1	1	1	1	1	1
23	V_{14}	[0 1 2]	0	0	0	1	1	1	1	1
24	V_{15}	[0 0 2]	0	0	0	0	1	1	1	1
25	V_{16}	[1 0 2]	0	1	0	0	0	1	1	1
26	V_{17}	[2 0 2]	1	1	0	0	0	1	1	1
27	V_{18}	[2 0 1]	1	1	0	0	0	0	0	1

de conmutación significan la conexión de cada una de las fases de salida ya sea con la terminal negativa (N), neutra (Z) o positiva (P) del bus de CD del convertidor (Yaramasu, 2017).

En la Figura 7 se muestra la configuración en SimPowerSystems de los bloques utilizados para implementar esta estrategia de modulación PWM en el convertidor B2B NPC 3N, y así controlar la apertura y cierre de sus interruptores IGBT. Para Twin Builder se utilizó el modelo PWM incluido en la librería, el cual está desarrollado en HDL (*Hardware Description Language* - Lenguaje de Descripción de Equipo Físico).

La Figura 8 muestra los parámetros de configuración utilizados para modelar los IGBTs en ambas plataformas.

Figura 7
Estrategia de modulación PWM del convertidor B2B NPC 3N.

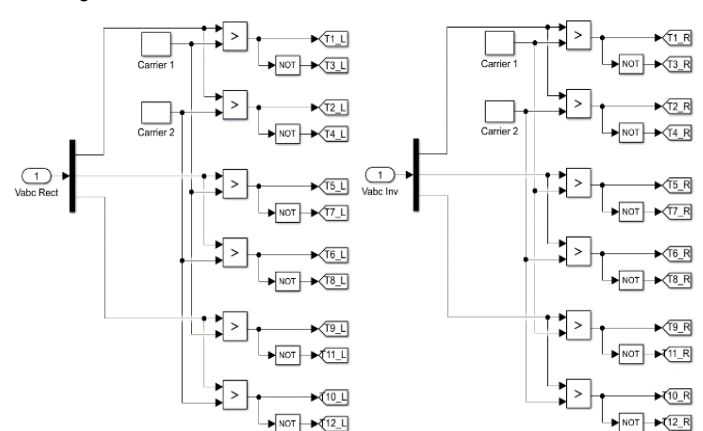
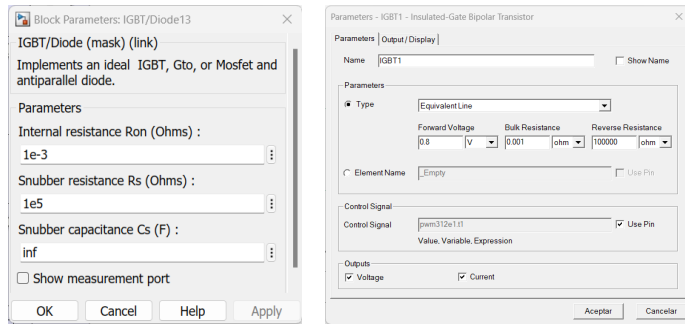


Figura 8
Parámetros del IGBT: (Izquierda) SimPowerSystems, (Derecha) Twin Builder.



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las simulaciones en *SimPowerSystems* se llevaron a cabo en la versión 2018a de MATLAB, mientras que las de *Twin Builder* se realizaron en la versión 2022R2 de ANSYS. Ambos programas se ejecutaron en una computadora basada en el sistema operativo Windows, con un procesador Intel Core i5-11400H a 2.70GHz y una memoria RAM de 16 GB.

La Figura 9 presenta los voltajes obtenidos del sistema simulado en ambas plataformas. Obsérvese como las señales de voltaje de las tres fases ABC correctamente corresponden a las de un sistema equilibrado.

Las corrientes de salida obtenidas en ambos lados del convertidor se muestran en la Figura 10. Obsérvese como los voltajes y las corrientes del lado rectificador están fuera de fase lo que significa que su red está recibiendo potencia, mientras que del lado inversor están en fase, y por lo tanto su red está proporcionando potencia. Es importante notar como las curvas obtenidas en ambas plataformas son prácticamente iguales.

Figura 9
Voltajes ABC obtenidos del lado rectificador y del lado inversor: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.

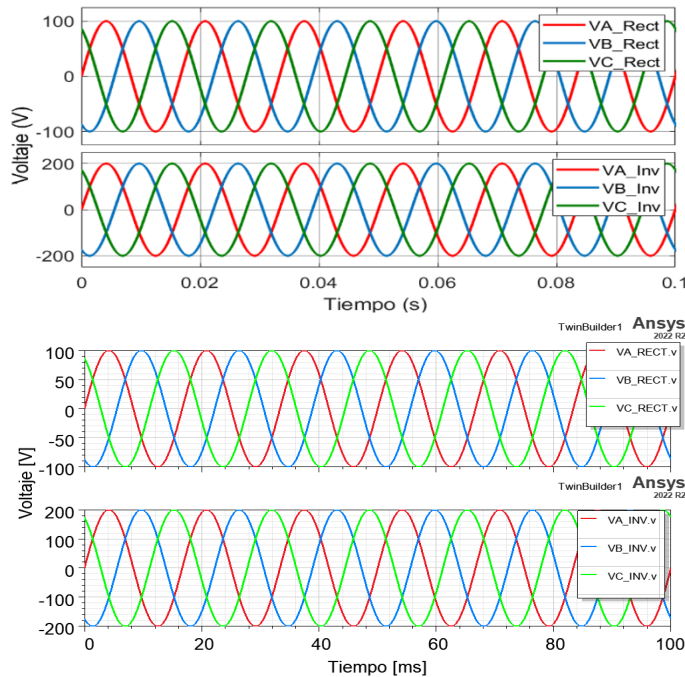
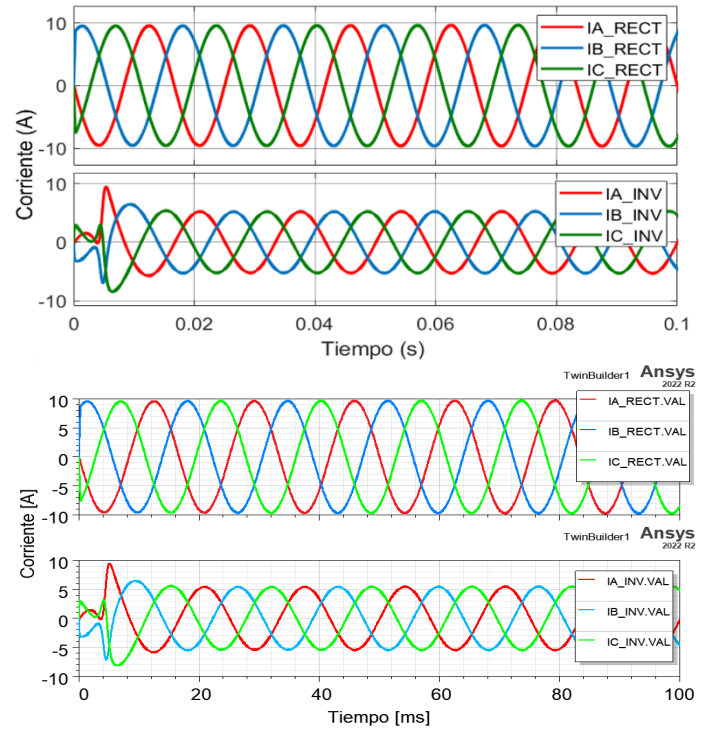


Figura 10
Corrientes ABC obtenidas del lado rectificador y del lado inversor: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.



El control de ambos lados del convertidor se realizó en el marco de referencia síncrono dq . Por lo tanto, las corrientes ABC fueron convertidas a valores constantes mediante la transformada de Clarke/Park, obteniendo así los resultados mostrados en la Figura 11. Nótese que el símbolo de asterisco en las variables representa una referencia o valor deseado. A partir de las curvas

Figura 11
Corrientes dq del lado rectificador y del lado inversor: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.

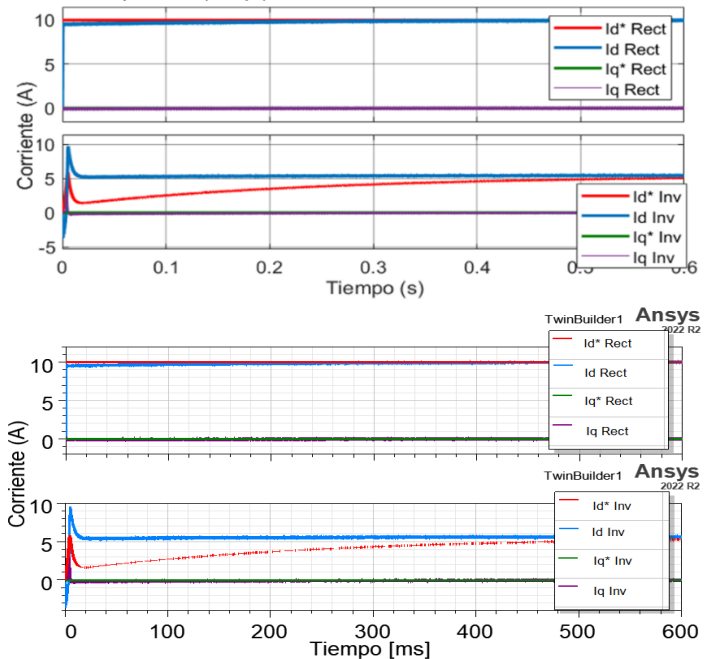


Figura 12
Voltaje en el bus de CD del convertidor B2B NPC 3N: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.

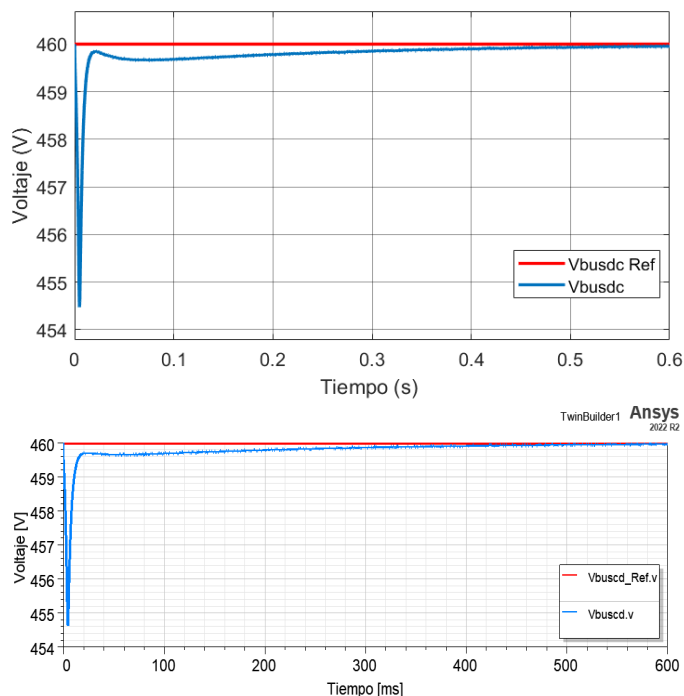
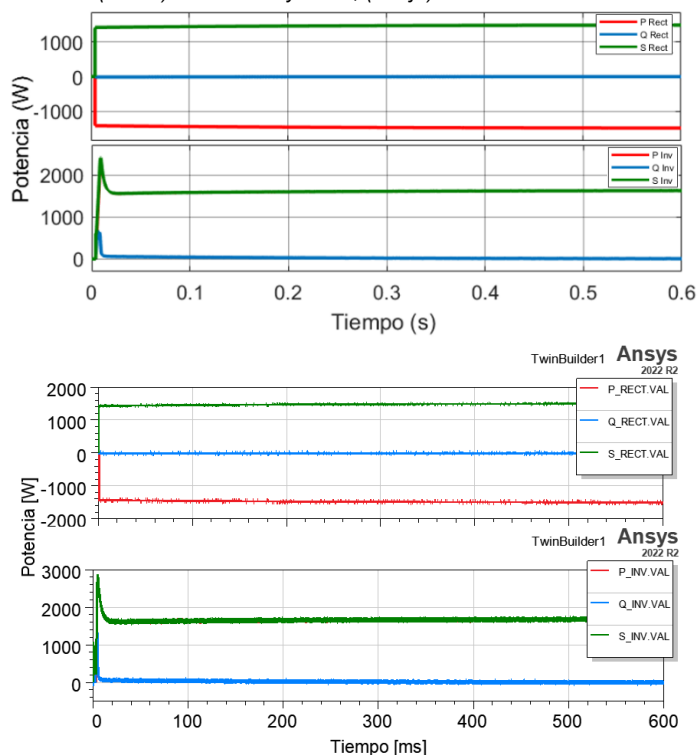


Figura 13
Potencias activa P, reactiva Q y aparente S del lado rectificador y del lado inversor: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.



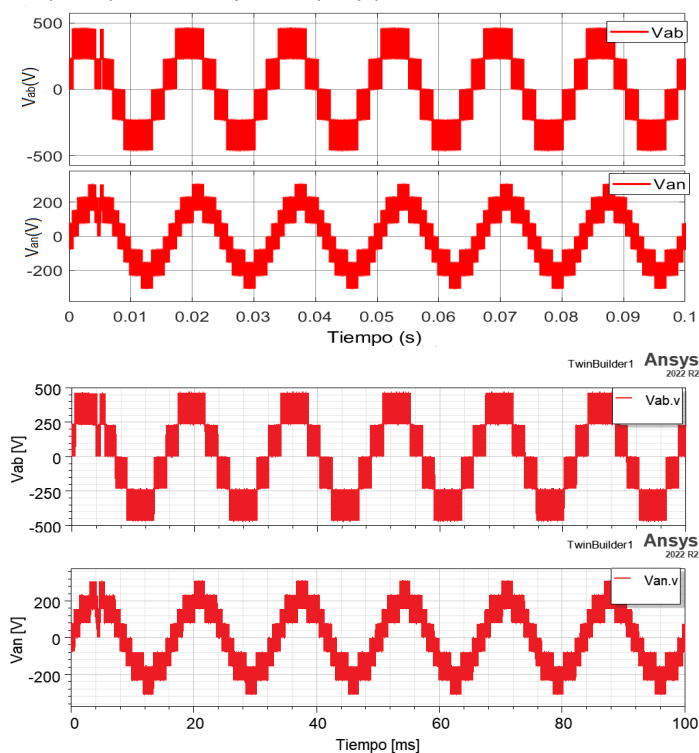
de corriente dq obtenidas en ambas plataformas de simulación se verifica cómo el control se lleva a cabo de forma correcta pues el valor medido sigue rápidamente a la referencia, y en estado permanente prácticamente se traslapan.

De manera similar, en la Figura 12 se muestran las curvas obtenidas para el control del voltaje del bus de CD. Obsérvese como los resultados en las dos plataformas son exactamente los mismos, y los voltajes convergen en estado estable a los 460V de referencia.

En la Figura 13, se muestran las potencias activa P, reactiva Q y aparente S, tanto del lado rectificador como del lado inversor. Es notable observar cómo los resultados de *SimPowerSystems* y *Twin Builder* también son iguales.

Finalmente, en la Figura 14, se comparan los voltajes de salida del convertidor B2B NPC 3N. Obsérvese como el voltaje de línea tiene 5 niveles, mientras que el voltaje de fase tiene 9 niveles. Los demás voltajes V_{bc} , V_{ca} , V_{bn} y V_{cn} del sistema trifásico se han omitido para así tener una mejor apreciación de las curvas sin que haya traslape de las mismas. Nótese también que los resultados arrojados por ambas plataformas son los mismos. Sin embargo, la diferencia radica en el tiempo requerido para obtenerlos pues *SimPowerSystems* tiene una mayor rapidez de simulación derivado de la menor complejidad de su modelo, en cambio *Twin Builder* tarda mucho más debido a que el sistema simulado se modela con un mayor detalle.

Figura 14
Voltajes de línea (5 niveles) y de fase (9 niveles) del convertidor B2B NPC 3N: (Arriba) SimPowerSystems, (Abajo) Twin Builder.



La Tabla 4 presenta los tiempos de ejecución de ambas plataformas para simular el modelo completo de la Figura 2 que incluye el convertidor B2B NPC 3N de la Figura 3.

Tabla 4
Tiempo de ejecución de la simulación en ambas plataformas.

Programa	Duración	Unidad
SimPowerSystems de MATLAB	24.11	s
Twin Builder de ANSYS	139.2	

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el estudio comparativo de las plataformas *SimPowerSystems* de MATLAB y *Twin Builder* de ANSYS para el modelado y el control de un convertidor trifásico B2B NPC de 3 Niveles.

Los resultados obtenidos de ambas plataformas fueron prácticamente los mismos. Respecto al tiempo de ejecución de las simulaciones, *SimPowerSystems* fue casi 6 veces más rápido que *Twin Builder*. Sin embargo, a diferencia de *SimPowerSystems*, *Twin Builder* aún tiene la capacidad de poder modelar incluso la parte térmica del convertidor, lo que permitiría estudiarlo como un sistema multifísica con mucho más detalle.

Por otro lado, la curva de aprendizaje del programa *SimPowerSystems* es mucho más corta que la de *Twin Builder*, ya que existe una amplia comunidad de usuarios que lo utilizan, y, por lo tanto, hay un mayor soporte y acceso a información y a ejemplos. Aunque también hay comunidades y foros de usuarios de *Twin Builder*, éstos no son tan comunes y detallados como los de *SimPowerSystems*.

Referente al costo anual del mantenimiento de las licencias, *Twin Builder* es menos caro pues ronda los \$3000 pesos, mientras que el de *SimPowerSystems* es de \$9000 pesos, el cual ya incluye el pago por MATLAB y Simulink.

En base al estudio cualitativa y cuantitativo realizado, se puede concluir que la mejor solución para el modelado y control de los convertidores de potencia es una co-simulación con ambas plataformas, para así explotar las fortalezas de cada una y obtener resultados detallados en menos tiempo.

V. AGRADECIMIENTOS

D. G. Triana-González agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado en el marco del "Programa de Becas Nacionales para Estudios de Posgrado" con número de solicitud 2021-000001-01NACF-03068.

Los autores también agradecen al TecNM, al Instituto Tecnológico de La Laguna y al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo por el apoyo económico recibido para el desarrollo del presente trabajo de investigación.

VI. REFERENCIAS

- Bashir, I., & Bhat, A. H. (2022). Design and Performance Evaluation of Switched Reluctance Motor using ANSYS Electronics Desktop. 2022 1st International Conference on Sustainable Technology for Power and Energy Systems (STPES). DOI:10.1109/stpes54845.2022.10006469
- Beg, N., Rahmoun, A., Armstorfer, A., Rosin, A., & Biechl, H. (2016). Determination methods for controller parameters of back-to-back converters in electric power grids. 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ). DOI:10.1109/pq.2016.7724106
- Biancolini, M.E., & Cella, U. (2020). Flexible Engineering Toward Green Aircraft. Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36514-1>
- Bueno, E., Cobreces, S., Rodriguez, F. V., Hernandez, A. C., & Espinosa, F. (2008). Design of a Back-to-Back NPC Converter Interface for Wind Turbines With Squirrel-Cage Induction Generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(3), 932–945. DOI:10.1109/tec.2008.918651
- Li, S., Haskew, T. A., Williams, K. A., & Swatloski, R. P. (2012). Control of DFIG Wind Turbine With Direct-Current Vector Control Configuration. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3(1), 1–11. DOI:10.1109/tste.2011.2167001
- Li, X., Yuan, S., Zhang, D., Bai, C., Huibiao, Y., Hao, Z., & Xu, J. (2018). The Simplified Model of Back-To-Back PWM Converter. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. DOI:10.1088/1757-899x/452/4/042030
- Mazzone, V. (2002). Controladores PID. [Archivo PDF] <https://www.eng.newcastle.edu.au/~jhb519/teaching/caut1/Apuntes/PID.pdf>
- Naderi, M., Khayat, Y., Shafiee, Q., Dragicevic, T., Bevrani, H., & Blaabjerg, F. (2020). Interconnected Autonomous ac Microgrids via Back-to-Back Converters—Part II: Stability Analysis. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(11), 11801–11812. DOI:10.1109/tpel.2020.2986695
- Portillo, R., Prats, M., Leon, J. I., Sanchez, J. G., Carrasco, J. M., De Teresa Galván, E., & Franquelo, L. G. (2006). Modeling Strategy for Back-to-Back Three-Level Converters Applied to High-Power Wind Turbines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(5), 1483–1491. DOI:10.1109/tie.2006.882025
- Samanes, J., Gubia, E., Juankorena, X., & Gironés, C. R. (2020). Common-Mode and Phase-to-Ground Voltage Reduction in Back-to-Back Power Converters With Discontinuous PWM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(9), 7499–7508. DOI:10.1109/tie.2019.2942553
- Simscape Electrical. (2023). [Comentario en foro en línea] <https://la.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>
- Xu, X., Zheng, Z., Wang, K., Yang, B., & Li, Y. (2020). A Comprehensive Study of Common Mode Voltage Reduction and Neutral Point Potential Balance for a Back-to-Back Three-Level NPC Converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(8), 7910–7920. DOI:10.1109/tpel.2019.2961385
- Yaramasu, V., & Wu, B. (2017). Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems. IEEE PRESS. WILEY.
- Yingchao, Z., Zhengming, Z., Ting, L., Yongchang, Z., & Liqiang, Y. (2008). A novel control scheme for three-level NPC back-to-back converter. 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. DOI:10.1109/vppc.2008.4677437
- Zhang, Z., Li, Z., Kazmierkowski, M. P., Rodriguez, J., & Kennel, R. (2018). Robust Predictive Control of Three-Level NPC Back-to-Back Power Converter PMSG Wind Turbine Systems With Revised Predictions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 33(11), 9588–9598. DOI:10.1109/tpel.2018.2796093