

# REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE EMULADORES DE PERTURBACIONES ELÉCTRICAS Y SU POSIBLE APLICACIÓN EN SISTEMAS DE GENERACIÓN EÓLICA

*REVISION OF THE STATE OF THE ART OF EMULATORS OF  
ELECTRICAL DISTURBANCES AND THEIR POSSIBLE  
APPLICATION IN WIND GENERATION SYSTEMS*

**Carlos Antonio Gómez Saavedra**

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México  
*cags.dcm@gmail.com*

**Adolfo Rafael López Núñez**

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México  
*adolfo.lopez@itesi.edu.mx*

**José Miguel Sosa Zúñiga**

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México  
*jmsosa@itesi.edu.mx*

**Mario Alberto Juárez Balderas**

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México  
*mario.juarez@itesi.edu.mx*

**Cesar Augusto Limones Pozos**

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, México  
*cesar.limones@itesi.edu.mx*

**Recepción:** 16/septiembre/2019

**Aceptación:** 29/octubre/2019

## Resumen

Las energías renovables son una alternativa que se ha implementado para amortiguar el impacto negativo que han tenido las energías no renovables en el planeta, entre la amplia gama de energías renovables se encuentran los sistemas de generación eólica, también conocidos como WECS (Wind Energy Conversion System), los cuales normalmente se encuentran interconectados a la red eléctrica. En la red eléctrica existen perturbaciones que pueden provocar efectos negativos en la calidad de la energía, así como posible daño del generador. Entre las perturbaciones eléctricas más comunes en contexto de los generadores eólicos son los armónicos, huecos de voltaje y sobretensiones, mejor conocidos como SAGs y

SWELL, respectivamente, los cuales normalmente son provocados por cargas no lineales conectadas a la red eléctrica. En el caso particular de los armónicos, existen diversas soluciones para mitigar los efectos negativos de éstos en los WECS. Sin embargo, con el fin de comprobar correctamente las soluciones planteadas, es necesario contar con un sistema que permita emular la presencia de armónicos en la red eléctrica. En este sentido, este trabajo muestra una revisión del estado del arte respecto a los emuladores de perturbaciones eléctricas, esto debido a que se pretende en un futuro implementar un emulador de este tipo de perturbación en un WECS, con el fin de probar diversos controladores que permitan la mitigación de dicha perturbación eléctrica.

**Palabras Clave:** Emulador de armónicos, generación eólica, perturbaciones armónicas.

### **Abstract**

*The renewable energies are an alternative that has been implemented to reduce the negative impact on the world, due to the excessive use of nonrenewable energies. Among the renewable energies, there are the Eolic Energy systems or WECS, normally, this kind of systems are regularly connected to the grid. In the grid, there are disturbances that can bring negative effects on the quality of the electrical energy, as well as possible generator damage.*

*The most common disturbances that have been reported in WECS are SAGS, SWELL and harmonics, this kind of disturbances are caused by nonlinear loads that are connected to the grid. Specifically for the harmonic disturbances, there are some alternatives to eliminate the negative effects in WECS. However, in order to ensure that the proposed solutions work correctly, it is necessary to have a system that can emulate the harmonic disturbances from the grid.*

*Therefore, this paper shows a state of art revision regarding the harmonic disturbances emulators; mainly because it is intended to implement in the future a harmonics emulator that will be coupled into a WECS in order to test different harmonic mitigation controllers.*

**Keywords:** Eolic generation, harmonics emulator, harmonic disturbances.

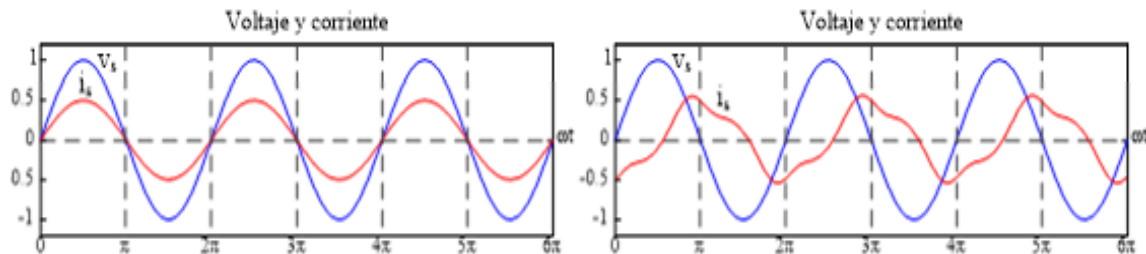
## **1. Introducción**

Actualmente, en México la dependencia energética mediante el consumo de combustibles fósiles está mayoritariamente cubierta por el gas y el petróleo. Estas fuentes no renovables impactan fuertemente en la calidad del medio ambiente, provocando problemas como contingencias ambientales y acrecentamiento del efecto invernadero en el planeta. Una alternativa que países como Dinamarca, Alemania y España han implementado es optar por la producción de energía eléctrica por medio de fuentes renovables [Global Status Report, 2018]. Las energías renovables como la energía solar, eólica, térmica, hidráulica entre otras, tienen la ventaja de que su proceso de regeneración es cíclico a corto plazo.

Específicamente, en lo que respecta a los WECS, se necesitan sistemas de electrónica de potencia para gestionar la energía producida, de manera que se pueda inyectar a la red eléctrica de manera adecuada. Actualmente los sistemas para gestionar la energía producida por fuentes eólicas son sistemas eficientes y de bajo costo; lo que ha permitido mayor flexibilidad en la interconexión de los WECS con la red eléctrica.

A pesar de ello, las compañías dedicadas al sector energético se han enfrentado a nuevos problemas, como la confiabilidad de las fuentes de generación y la calidad de la energía que estas fuentes producen. La calidad de la energía tiene como objetivo que el voltaje y la corriente de un sistema sean puramente sinusoidal, mediante los parámetros de voltaje, corriente y frecuencia. Una buena calidad de la energía se alcanza cuando los voltajes y corrientes en un sistema eléctrico son sinusoidales puras, sin distorsión armónica y con el desplazamiento adecuado [Gómez, 2018]. Normalmente, los sistemas conectados a la red eléctrica como los WECS son afectados por cargas no lineales, algunos ejemplos de estas cargas son: cargadores de baterías, hornos de microondas, refrigeradores, televisiones, soldadoras de arco, controladores de velocidad, iluminación electrónica, hornos de inducción entre otros. Entre las perturbaciones que afectan a los WECS son los armónicos, SAGs y SWELL. Específicamente, en lo que respecta a los armónicos, estos se caracterizan por ser ondas sinusoidales con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental [Blume, Schalabbach y Stephanblome, 2011]. Estas formas

de onda se suman a la fundamental ocasionando distorsión tanto en la corriente como en el voltaje de red; provocando que la calidad de la energía producida sea deficiente y, además, que genere un posible daño al generador. En la figura 1 se muestra un sistema sin perturbaciones armónicas y con perturbaciones armónicas, respectivamente.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Sistemas eléctricos sin y con perturbaciones armónicas en corriente.

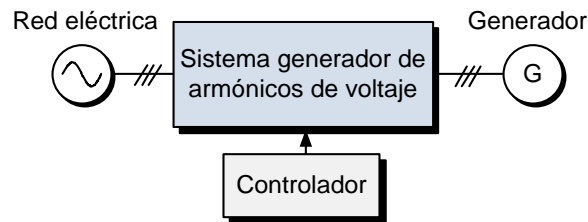
Como se mencionó anteriormente, se han propuesto diversas soluciones ante este problema, existen soluciones externas al WECS, como lo son los STATCOM (compensador estático), DVR (Restaurador dinámico de voltaje) o UPQC (acondicionador unificado de la calidad de la energía) [López, 2017]. Además de estas soluciones existen las soluciones asociadas a los sistemas WECS, que consisten en controladores como proporcional-integral (PI), proporcional-resonante (PR) y proporcional-integral-resonante (PIR) [López, 2017].

Sin embargo, para evaluar correctamente el funcionamiento de estas y de futuras soluciones es necesario emular los armónicos en un ambiente controlado, en donde se especifique el orden, amplitud y duración del armónico. En este sentido, es fundamental conocer el estado actual de los emuladores de armónicos, y más específicamente asociados a los WECS, con el fin de realizar una correcta selección de la topología apropiada para este sistema en particular.

Los emuladores de armónicos deben cumplir diversas características para que puedan ser utilizados en los WECS, los cuales son:

- Producir armónicos de voltaje de orden, amplitud y duración deseada.
- Ser un sistema bidireccional.

En la figura 2 se muestra un diagrama general del sistema de generación de armónicos que se pretende implementar en un trabajo futuro y sobre el cual se basa la búsqueda del estado del arte que se realiza en este artículo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2 Diagrama general de un generador de armónicos.

## 2. Métodos

La metodología para realizar el estado del arte consistió en dos etapas principales, primero se realizó una búsqueda de emuladores de perturbaciones eléctricas de manera general, posteriormente, de los resultados obtenidos se analizó específicamente los emuladores de armónicos.

Entre los emuladores encontrados, en la figura 3 se muestra el diagrama general que se implementó en [Gutierrez, Romero, Osorio, Morales y Granados, 2014]. En este trabajo se realizó el diseño e implementación de un sistema para emular perturbaciones eléctricas a través de la síntesis digital de señales.

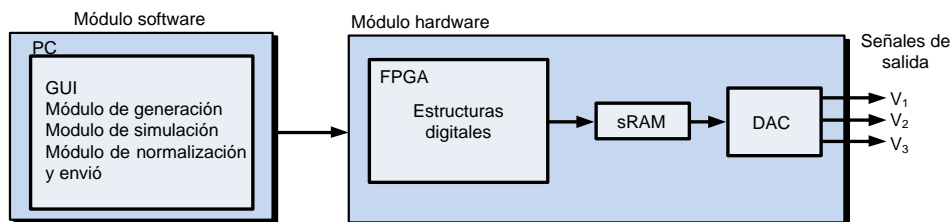


Figura 3 Diagrama general del sistema presentado, Fuente: [5].

En la figura 3, el diagrama general del sistema que está conformado por una interfaz gráfica de usuario y una estructura de hardware basada en un FPGA. Por parte de la interfaz gráfica se parametrizan las características en función del tipo de disturbio que se desee generar. Por otro lado, el hardware está enfocado a la síntesis y

conversión a señales físicas de voltaje. Los disturbios que genera este sistema son: SAG, SWELL, armónicos, fluctuaciones y microcortes de voltaje (notching).

Por otro lado, en Chavez, Roda y Ribeiro [2015] presentan un inversor trifásico en el cual se implementó un control repetitivo para la mitigación de componentes de alta frecuencia, estas debidas a la conmutación del convertidor. Los disturbios que se generan en este trabajo son SAGs, SWELL y armónicos. En la figura 4, se muestra la topología que se propone.

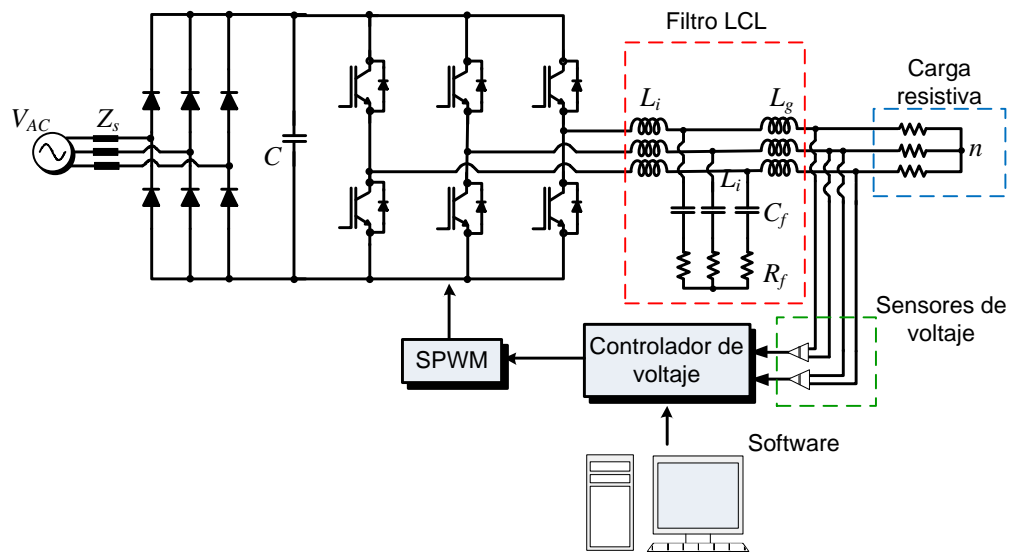


Figura 4 Topología, Fuente: [6].

Los voltajes presentes en la carga del sistema, en este caso resistiva, son la entrada del controlador. La emulación de las perturbaciones es controlada por los voltajes sensados y una señal de referencia, esta señal contiene las características típicas del tipo de perturbación que se desea emular. La salida del controlador comanda las señales de conmutación en el inversor, basándose en una modulación SPWM. La etapa de alimentación de esta topología se realiza mediante un rectificador no controlado trifásico de onda completa.

En [Calderon, López, Mina, 2015], se muestra el modelado y control de un generador de perturbaciones SAGs utilizando un convertidor back to back enfocado a un WECS. Al convertidor se le implementó un controlador vectorial orientado al voltaje de estator. En la figura 5 se muestra la topología implementada.

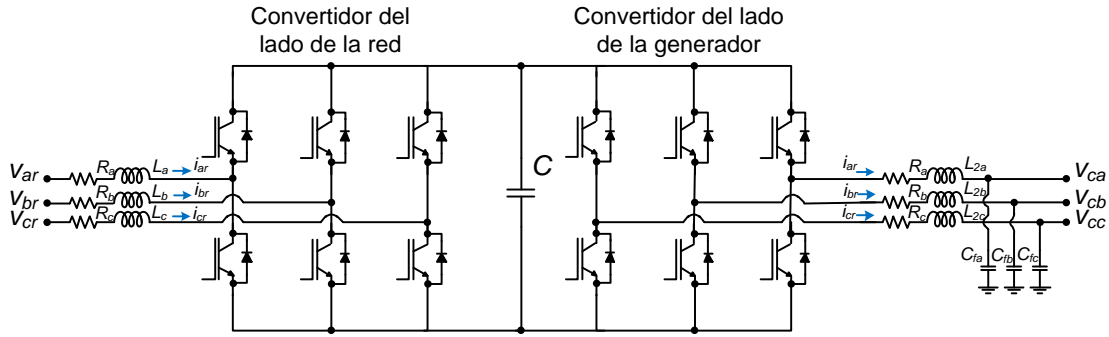


Figura 5 Convertidor back to back, Fuente: [7].

El convertidor está conformado por un inversor y un rectificador conmutados, estos dos convertidores están conectados entre sí mediante un capacitor de desacoplo  $C$ . Por parte del convertidor de lado de la red se encuentra un filtro RL y del lado del generador está un filtro RLC, la carga del sistema no se especifica en el artículo.

En este trabajo se fijan objetivos de control para ambos convertidores. El controlador del convertidor de lado de la red tiene los objetivos de regular el bus de DC en el capacitor  $C$ , y mantener la potencia reactiva  $Q$  en cero. Mientras que el convertidor del lado del generador se encarga de la emulación de los SAGs de voltaje mediante la implementación de un controlador vectorial previamente mencionado.

Gran parte de los sistemas de generación están enfocados a los SAGs, tal como se muestra en [Wichan Premrudeepreechacharn, Oranpiroj y Muangjai, 2014], en donde las perturbaciones son generadas mediante un software, en el cual se estipulan las características del SAG que se desee generar. Los autores de este artículo se basan en las normas SEMI F47 y IEC 61000-4-11 para asegurar la correcta emulación de SAGs. La estructura del generador de SAGs que proponen se muestra en la figura 6, el cual consiste en cuatro etapas: datos de entrada, software (emulador de SAGs), datos de salida y convertidor de potencia. En la primera etapa se estipulan las características del SAG que se desea generar, la etapa del software se encarga de procesar los datos adquiridos de la etapa anterior, además en un display se muestra la forma de onda. La etapa encargada de generar la señal contaminada con SAG es la denominada "datos de salida", finalmente estos datos son enviados a un convertidor de potencia para poder visualizarse en un osciloscopio. En este trabajo se generan SAGs balanceados y desbalanceados.

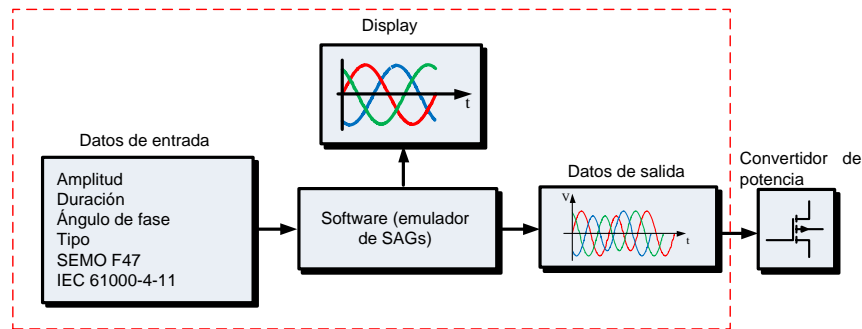


Figura 6 Programa para emular SAGs, Fuente: [8].

Entre los métodos para generar perturbaciones tipo SAG, SWELL e interrupciones se han implementado sistemas como en [Khadse, Chaudhari y Borghate, 2016]. Los cuales utilizan elementos electrónicos como los relevadores de estado sólido y elementos pasivos como los autotransformadores. En la figura 7; se muestra un sistema para la generación de SAGs, SWELL e interrupciones en voltaje, estas perturbaciones se emulan conectando al sistema una carga resistiva, con la ventaja de que son perturbaciones controladas.

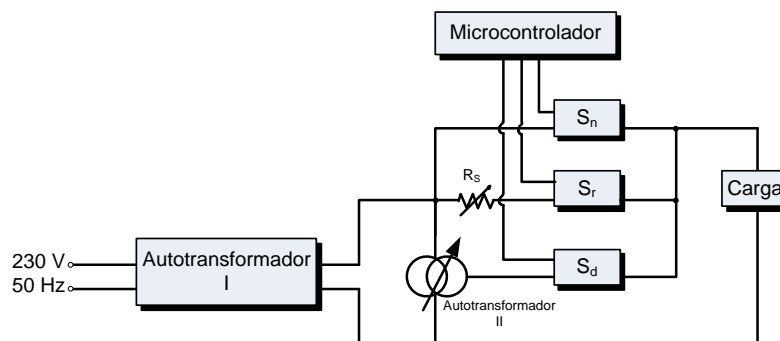


Figura 7 Diagrama general para la emulación de SAGs, Fuente: [9].

El autotransformador I tiene el objetivo de fijar el voltaje de entrada en el sistema y el autotransformador II es para alimentar la perturbación que se desee emular. Los relevadores de estado sólido son los encargados de decidir qué perturbación se genere en la carga, y por medio del microcontrolador se controla la duración del disturbio.

En [García, Leon, Monedero YrOPERO, 2007] se muestra un sistema que es capaz de generar diversos tipos de perturbaciones eléctricas transitorias y periódicas.



Entre las perturbaciones transitorias se generan: impulsos, oscilaciones, SAGs, SWELL, interrupciones, parpadeos (flicker) y variaciones de frecuencia, por otro lado, en lo que respecta a las perturbaciones periódicas únicamente se encuentran los armónicos. La figura 8 muestra el sistema en general, en el que se muestra el sistema emulador de perturbaciones eléctricas.

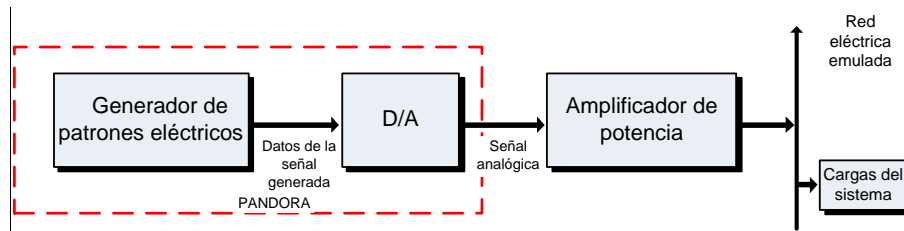


Figura 8 Diagrama de un emulador de perturbaciones eléctricas, Fuente: [10].

Primeramente, el subsistema denominado “pandora” permite la generación programable de señales que emulan el comportamiento de la red eléctrica, permitiendo a su vez la adición de perturbaciones en dicha señal emulada. La función del amplificador de potencia es la de elevar las señales provenientes de “pandora”, estas señales se amplifican a un voltaje de  $230 V_{rms}$ .

En la tabla 1 se muestran de manera resumida artículos encontrados, en donde se exponen las principales características y la emulación que es capaz de realizar.

### 3. Resultados

En esta sección se plantea cuál de los sistemas presentados en la sección anterior es más adecuado con respecto al sistema de emulación de armónicos en un WECS que se pretende desarrollar para un trabajo futuro.

Los sistemas desarrollados en [Gutiérrez, Romero, Osorio, Morales y Granados, 2014], [Chavez, Roda y Ribeiro, 2015], [Wichan, Premrudeepreechacharn, Oranpiroj y Muangjai, 2014], [Khadse, et. al., 2016] y [García, et. al., 2007], son sistemas capaces de emular diversas perturbaciones eléctricas, en donde es posible modificar las características principales de dichas perturbaciones. Sin embargo, estos sistemas no son bidireccionales, es decir; son capaces de entregar energía a la red eléctrica o hacia una carga, pero no son capaces de recibirla. En

este sentido, estos sistemas no son adecuados para utilizarse como emulador de armónicos en un WECS, esto debido a que en un WECS la energía fluye tanto del generador hacia la red eléctrica y viceversa, es por esta razón la necesidad de un sistema bidireccional.

Tabla 1 Topologías utilizadas para la emulación de perturbaciones eléctricas.

Artículo	Tipo de emulación	Características
[5]	SAG, SWELL, armónicos, fluctuaciones y notching	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema basado en una tarjeta FPGA.</li> <li>• El sistema no es bidireccional.</li> <li>• Las emulaciones se inyectaron a la red eléctrica.</li> </ul>
[6]	SAG, SWELL y armónicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se basa en un inversor trifásico y un rectificador trifásico no controlado.</li> <li>• Utilizan un controlador repetitivo.</li> <li>• El sistema no es bidireccional.</li> <li>• Utilizan filtros para el acoplamiento del inversor con la carga, en este caso es resistiva.</li> </ul>
[7]	SAG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se basa en un convertidor back to back.</li> <li>• El convertidor es bidireccional.</li> <li>• Utiliza controladores orientados al voltaje del estator.</li> <li>• Se ha implementado en WECS.</li> </ul>
[8]	SAG	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se basa en cuatro etapas principales: datos de entrada, software, datos de salida y convertidor de potencia.</li> <li>• El sistema no es bidireccional</li> </ul>
[9]	SAG, SWELL e interrupciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El sistema se basa en dos autotransformadores, tres relevadores y un microcontrolador.</li> <li>• El sistema no es bidireccional.</li> <li>• Las emulaciones de SAG y SWELL son consumidas mediante una carga resistiva.</li> </ul>
[10]	Impulsos, oscilaciones, SAG, SWELL, interrupciones, flicker, variaciones de frecuencia y armónicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Las emulaciones generadas no fueron inyectadas a la red eléctrica.</li> <li>• El sistema no es bidireccional.</li> <li>• Las emulaciones generadas son enviadas a un amplificador de potencia mediante un convertidor digital-analógico o DAC (Digital-Analog Converter).</li> </ul>

*Fuente: Elaboración propia*

Como se mencionó anteriormente, el sistema implementado en [Calderon et. al., 2015] se basa en un convertidor back to back, el cual tiene la característica de permitir un flujo bidireccional de energía, siendo ampliamente utilizado en los WECS [López, Mina, Cardenas, De Leon, Calderon y Aguayo, 2016]. Del trabajo mostrado en [Calderon et. al., 2015] se observa la implementación de controladores, capaces de emular SAGs con la libertad de definir la amplitud y duración del SAG. Además,

se menciona que se optó por trabajar con un convertidor back to back debido a su amplia versatilidad para sintetizar diferentes tipos de SAGs, e incluso su funcionamiento puede extenderse a generar señales con diversos contenidos armónicos. Teniendo esto en cuenta se considera que el sistema que más se adecua respecto al emulador de armónicos es el artículo presentado en [Calderon et. al., 2015], con base a las características anteriormente mencionadas.

#### **4. Discusión**

En este artículo se recopilaron trabajos relacionados con la emulación de perturbaciones eléctricas, esto con el objetivo de seleccionar el sistema o topología más viable para implementar un emulador de perturbaciones armónicas enfocado a un sistema de generación eólica. Entre los artículos encontrados, se mostraron diversos sistemas para generar perturbaciones eléctricas, tales como SAGs, SWELL, variadores de frecuencia, armónicos, entre otros. Con la revisión del estado del arte se concluyó que la topología más apropiada es aquella basada en un convertidor back to back, esto debido a ventajas mencionadas en sección anterior.

#### **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] REN21, «Renewables 2018, Global Status Report,»: <https://www.ren21.net/about-us/ren21-s-identity/> (10/Julio/2019).
- [2] C. A. Gomez Saavedra, Diseño Análisis e Implementación de un Convertidor Reductor en MCD para la Mejora del Factor de Potencia, 2018.
- [3] D. Blume, J. Schlabach y T. Stephanblome, Voltage Quality in Electrical Power Systems, 2001.
- [4] R. López Núñez, Estrategias para la compensación de perturbaciones armónicas en sistemas de generación eoloelectrica interconectados a la red, Tesis de doctorado, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2017.
- [5] C. Gutiérrez Torres, R. d. J. Romero Troncoso, R. A. Osorio Rios, L. Morales Velázquez y D. Granados Lieberman, «Diseño de sistema reconfigurable

- para la síntesis de perturbaciones eléctricas basado en FPGA,» *Pistas Educativas*, n° 108, pp. 594-614, 2014.
- [6] E. R. Chaves, V. O. Roda y R. L. Ribeiro, «Power Converters Based Electrical Disturbance Generator Using Repetitive Control,» de 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015.
- [7] G. Calderon Zavala, A. R. López Nuñez y J. D. Mina Antonio, «Modelado y control de un generador de SAGS basado en un convertidor back to back,» *Pistas Educativas*, n° 112, pp. 61-80, 2015.
- [8] J. Wichan, S. Premrudeepreechacharn, K. Oranpiroj y . W. Muangjai, «Voltage Sag Signal Generator Program for Testing Electrical Equipment,» de 2014 International Electrical Engineering Congress, iEECON 2014, 2014.
- [9] C. B. Khadse, M. A. Chaudhari y V. B. Borghate, «A Laboratory Set-Up for Power Quality Disturbance Generator and Real Time Power Quality Monitoring,» de WIECON-ECE 2016 - 2016 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering, 2016.
- [10] García, C. Leon , I. Monedero y J. Roperó , «A Precise Electrical Disturbance Generator for Neural Network Training with Real Level Output,» de Progress in Pattern Recognition, Image Analysis and Applications: 12th Iberoamericann Congress on Pattern Recognition, CIARP 2007, Valparaiso, Chile, November 13-16, 2007.
- [11] R. López Núñez , J. D. Mina , V. M. Cardenas Galindo , S. E. De Leon Aldaco , G. Calderon Zavala y J. Aguayo Alquicira , «Harmonic Distortions on Grid Connected Double Fed Generator: A Review,» IEEE Latin America Transactions, vol. 14, n° 4, pp. 1745-1751, 2016.