

Efecto de la intensidad de la ráfaga de viento sobre el convertidor de potencia de un aerogenerador

Gregorio Martínez Reyes ^{1,*}, Emmanuel Hernández Mayoral ², Carlos Javier Martínez Hernández ³, Edwin Fernando Mendoza Santos ⁴, Christian René Jiménez Román ², Omar Rodríguez Rivera ², Efraín Dueñas Reyes ¹

¹ Energía eólica, División de estudios de posgrado, Univesidad del Istmo, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México

² Energía eólica, Instituto de Energías Renovables (IER), Universidad Nacional Autónoma de México, Temixco, Morelos, México

³ Energía eólica, Ingeniería Industrial, Universidad del Istmo, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México

⁴ Energía eólica, Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya, Guanajuato, México

* Autor de correspondencia, mrg.23@hotmail.com; Tel.: (52 9711130702)

Energías Renovables (Energía Eólica: Ráfagas de viento).

Resumen: Se utilizan dos tipos de ráfagas de viento extremas, la Ráfaga Extrema de Operación (EOG) y la Ráfaga Extrema Coherente (ECG). Se desarrolla un método de detección de ráfagas extremas con la finalidad de determinar las ráfagas de viento extremas de mayor intensidad y amplitud con ayuda del software Matlab-Simulink®, para posteriormente modelarlas y simularlas en una estructura de un aerogenerador aislado de baja potencia sin control automático mediante el software PSIM, con ello, se analiza el efecto de la intensidad y amplitud de las ráfagas extremas sobre la confiabilidad del convertidor electrónico de potencia, donde la intensidad de la ráfaga de viento resulta ser más preponderante que la amplitud al ocasionar un mayor impacto negativo, lo cual contribuye en el diseño de debidas protecciones del convertidor de potencia.

Palabras claves: Ráfagas extremas de viento, Convertidores electrónicos de potencia, Aerogeneradores.

Effect of wind gust intensity on the power converter of a wind turbine

Abstract: Two types of extreme wind gust are used, the Extreme Operating Gust (EOG) and the Extreme Coherent Gust (ECG). An extreme gust detection method is developed in order to determine the extreme wind gusts of greater intensity and amplitude with the help of Matlab- Simulink® software, to later model and simulate them in a structure of an isolated low power wind turbine without control automatic through the PSIM software, with this, the effect of the intensity and amplitude of the extreme gusts on the reliability of the electronic power converter is analyzed, where the intensity of the wind gust turns out to be more preponderant than the amplitude when causing a greater negative impact, which contributes to the design of proper power converter protections.

Keywords: Extreme wind gusts, Power electronic converters, Wind turbines

Introducción

Hoy en día, los aerogeneradores representan una instalación destacada para generar grandes cantidades de energía limpia y renovable para las redes de servicios públicos. Básicamente, hay muchas buenas razones para utilizar más energía eólica en las redes eléctricas. Sin embargo, los aerogeneradores o también llamados wind turbines en el idioma inglés (WT's) presentan inconvenientes al momento de interconectarse a la red eléctrica en materia de la calidad de la energía. Uno de los problemas de mayor consideración son los parpadeos eléctricos o también llamados Flickers en el idioma inglés, lo cual se define como una percepción visual del parpadeo de la luz resultante de las fluctuaciones rápidas de voltaje causadas por pulsaciones de potencia activa y/o cambios en el flujo de carga según el escaneo operativo. El parpadeo es vulnerable a las características del viento, los cuales son ocasionados por vientos turbulentos, también llamadas ráfagas de viento.

Como ya se mencionó, las ráfagas de viento generan parpadeos eléctricos en aerogeneradores, los cuales son causados principalmente por fluctuaciones en la potencia derivados de los cambios de carga en la red eléctrica y en menor medida por la cizalladura del viento, la sombra de la torre y problemas mecánicos, como describe (Fuladi & Akbari, 2016). Indica (Guerrón et al., 2014), los parpadeos eléctricos de régimen permanente presentes en turbinas eólicas son causados por ráfagas de viento variando la velocidad en los aerogeneradores, por lo tanto, este fenómeno no puede ser compensado, ni controlado en su totalidad por el sistema de control. La mitigación de Flickers mecánicamente se puede realizar con el incremento en el diámetro de las palas. Por su parte, (Abulanwar et al., 2019), argumenta que, el parpadeo es una percepción visual del parpadeo de la luz, resultante de fluctuaciones rápidas de voltaje causadas por pulsaciones de potencia activa y/o cambios en el flujo de carga. Asimismo (Alaboudy et al., 2012),

menciona que la emisión de parpadeo producida por turbinas eólicas de velocidad variable conectadas a la red con convertidores back-to-back durante el funcionamiento es causada principalmente por fluctuaciones en la potencia de salida.

Indica (Saad et al., 2018), la energía eléctrica de las turbinas eólicas ahora se clasifica como más eficiente y más valiosa que otros recursos de energía verde. Este notable desarrollo puede atribuirse principalmente al desarrollo de la tecnología. Sin embargo, las turbinas pequeñas aún se encuentran en su etapa de desarrollo.

En México, el uso de aerogeneradores de baja potencia es muy poco conocido, ya que depende de las condiciones del viento, sin embargo, prometen un gran futuro para la sociedad, un mundo más limpio y una reducción de costos.

El convertidor electrónico de potencia es parte del sistema de control, cuyos objetivos son extraer la máxima potencia de salida, mitigar o reducir los aspectos negativos de la calidad de la energía. Asimismo, un convertidor electrónico de potencia es un sistema o equipo electrónico que tiene por objetivo la conversión de energía eléctrica entre dos formatos diferentes (Ezhiljenekha & MarsaleinBerno, 2020).

Menciona (Ortea, 2015), que algunas posibles consecuencias de una mala calidad de la energía, son la excesiva potencia reactiva, contaminación armónica y variaciones en el voltaje; y por ello es importante, estudiar su impacto en los aerogeneradores, en especial, los causados por las ráfagas de viento. Además, los problemas de la mala calidad de energía en aerogeneradores son las elevaciones y caídas de voltaje, parpadeos, impulsos, armónicos, componentes de voltaje continuo, transitorios, interferencia electromagnética e interrupciones en el sistema eléctrico.

De acuerdo a la norma IEC 61400-2, describen 5 tipos de ráfagas (Internationale, 2013).

- ✓ Ráfaga Extrema de Operación (EOG).
- ✓ Cambio de Dirección Extremo (EDC).
- ✓ Ráfaga Extrema Coherente (ECG).
- ✓ Ráfaga Extremadamente Coherente con Cambio de Dirección (ECD).
- ✓ Cizalladura Extrema del Viento (EWS).

De igual manera, Branlard, menciona 5 métodos de detección.

- ✓ El incremento de velocidad sobre el umbral.
- ✓ Procedimiento Peak-Peak.
- ✓ Incremento de velocidad.
- ✓ Pico sobre el umbral.
- ✓ De correlación.

El objetivo del presente trabajo es determinar las taxonomías de las ráfagas de viento a utilizar, caracterizar éstas, así como también la detección de las ráfagas de viento extremas, lo cual consiste en la identificación de umbrales de cambios de la velocidad del viento en cierto tiempo que sean predefinidos como una ráfaga de viento extrema y determinar el efecto de las ráfagas de viento extremas en el convertidor electrónico de potencia en un aerogenerador de baja potencia, mediante una base de datos del Istmo de Tehuantepec.

Materiales y Métodos

Esta investigación se centró en el estudio de dos tipos de ráfagas de viento, argumentando que (Branlard, 2009) describe que la ráfaga EOG y ECG tiene mucha similitud con la ráfaga de sombrero mexicano y la ráfaga indicada como frente. Es por eso, que se analizan dos ráfagas de viento extremas. La Ráfaga Extrema de Operación (EOG) y la Ráfaga Extrema Coherente (ECG). A continuación, en la figura 1 y 2 se muestran las ráfagas descritas por la norma IEC 61400-2 y la figura 3 y 4, son las ráfagas descritas por (Branlard, 2009). Esto, con el fin de observar las similitudes en ambas ráfagas.

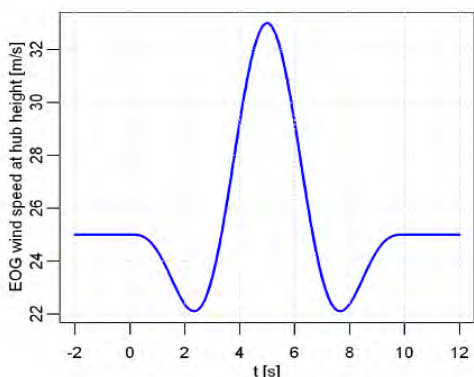


Figura 1. Ráfaga Extrema de Operación (EOG), IEC (2013).

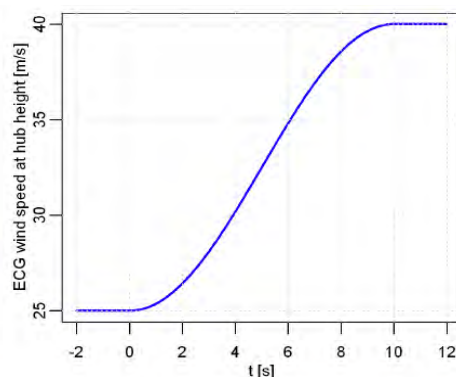


Figura 2. Ráfaga Extrema Coherente (ECG), IEC (2013).

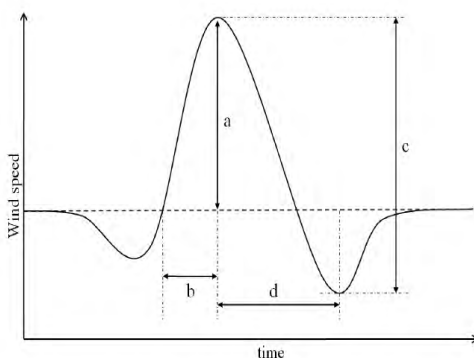


Figura 3. Ráfaga de sombrero mexicano, Branlard (2009).

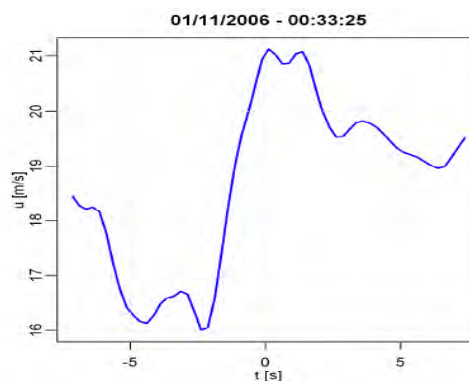


Figura 4. Un frente, Branlard (2009).

Indica (Branlard, 2009), la ráfaga extrema de operación (EOG), es una disminución de la velocidad seguida de una subida pronunciada, una caída pronunciada y un aumento de regreso al valor original. La amplitud y duración de la ráfaga, varían con el período del retorno. En cambio, la ráfaga extrema coherente (ECG), se trata de un cambio sostenido en la velocidad del viento, con una curva en forma de coseno, pero que termina en una velocidad del viento constante que corresponde a un aumento del viento, en comparación con la velocidad del viento antes de la ráfaga.

La ecuación 1, corresponde a la ráfaga EOG y la ecuación 2 corresponde a la ráfaga ECG.

$$V(t) = \begin{cases} V(z) - 0.37mp \sin\left(\frac{3\pi t}{T}\right) & \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right] \\ V(z) & \end{cases} \quad (1)$$

$$V(t, z) = \begin{cases} V(z) & \\ V(z)0.5U_{cg} \left[1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)\right] & \\ V(z) + U_{cg} & \end{cases} \quad (2)$$

Donde:

$v(t)$ = velocidad del viento

mp = amplitud de la ráfaga de viento EOG

$v(z)$ = velocidad del viento

U_{cg} = amplitud de la ráfaga de viento ECG

Para determinar el impacto de las ráfagas de viento en el convertidor electrónico de potencia de un aerogenerador de baja potencia se lleva a cabo en cuatro fases, en la primera fase se determinan qué tipos de ráfagas de viento extremas a utilizar, como segunda fase se propone un método de detección de ráfagas intensas de viento, como tercera fase se

determinan las ráfagas más intensas mediante una metodología de caracterización de ráfagas y por último, con ayuda del software PSIM las ráfagas de viento extremas se modelan y simulan en un aerogenerador aislado de baja potencia. El método de detección utilizado está basado en el método de incremento de velocidad sobre cierto umbral (Branlard, 2009), el cual solo fue usado con ráfagas ECG, el fundamento del código, es con base a un umbral de la diferencia de velocidades del viento en un movimiento de ventana variable. Este método presenta algunas ventajas frente a los demás:

- ✓ Detecta ráfagas de cualquier duración y amplitud.
- ✓ Utiliza una variable ajustable de diferencia de velocidades de viento.
- ✓ Especifica la forma de dos tipos de ráfagas.

La metodología para la caracterización de la ráfaga de viento se muestra a continuación:

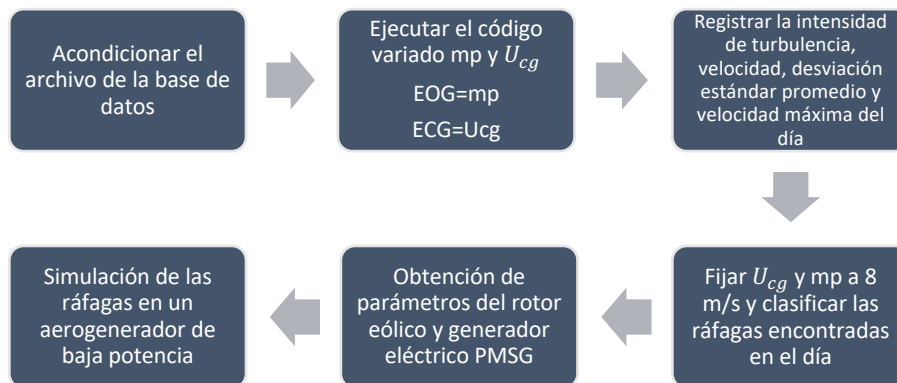


Figura 5. Metodología de caracterización

Para la simulación, se utilizó el software PSIM, se desarrolló dos modelos de las ráfagas de viento, el modelo para la Ráfaga Extrema de Operación (EOG) y para la Ráfaga Extrema Coherente (ECG), con ayuda de las ecuaciones 1 y 2, mencionadas anteriormente. Se detectaron 12 ráfagas máximas con el código detector, 6 ráfagas EOG y 6 ráfagas ECG. Se clasificaron en “altas-medias-bajas”, sin embargo, estas ráfagas cumplen con una condición establecida. La condición fue que, en el par de ráfagas una debería tener mayor amplitud, pero menor intensidad que la otra, por su parte, la otra debería tener mayor intensidad, pero menor amplitud que la ya mencionada. Esto, con el fin de conocer, si la amplitud o intensidad, causan un mayor impacto negativo en el convertidor electrónico de potencia.

Las Ráfagas Extremas de Operación (EOG) detectadas, se encuentran en el rango de 12.1 m/s a 9.5 m/s , siendo la ráfaga extrema máxima de viento de 12.1 m/s . En cambio, las Ráfagas Extremas Coherentes (ECG) detectadas, se encuentra en el rango de 18.5 m/s a 14.3 m/s , siendo la ráfaga extrema máxima de viento ECG de 18.5 m/s . En la figura 6 y 7, se muestran las ráfagas EOG y ECG más intensas del periodo.

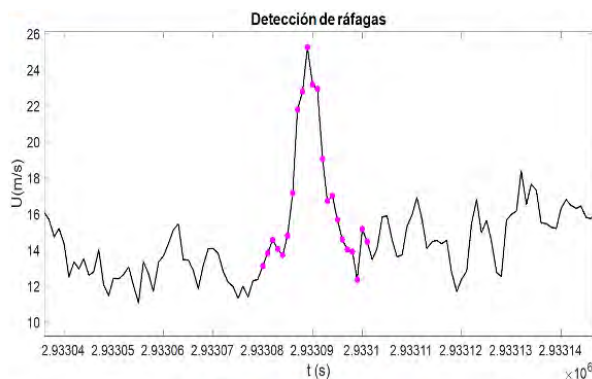


Figura 6. Ráfaga de operación más intensa del periodo.

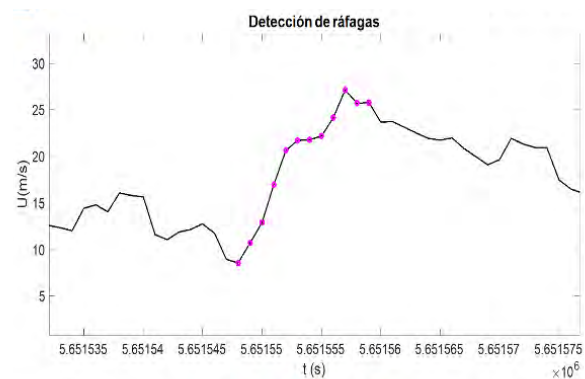


Figura 7. Ráfaga coherente más intensa del periodo.

Se realizaron cuatro pruebas en PSIM, que son las siguientes:

- ✓ Potencia en una línea que ingresa al convertidor del lado de la máquina.
- ✓ Voltaje Drenaje-Fuente de un interruptor de potencia.
- ✓ Corriente en un interruptor de potencia en el convertidor de lado de la máquina.
- ✓ Corriente en un interruptor de potencia en el convertidor de lado de la red.

La base de datos que se utilizó para el análisis, se obtuvo de la Ventosa, ubicada en la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México, con una frecuencia de muestreo de 1 Hz a una altura de 17.5 m en un periodo de septiembre de 2017 a enero de 2018.

Para la identificación del tiempo de cada ráfaga obtenida en la simulación, se ocupó la tabla 1 que se muestra.

Tabla 1. Tiempo de las ráfagas.

Tipos	A-rojo	B-cyan	C-verde	D-amarillo	E-azul	F-magenta
EOG/ECG	4s	5s	6s	7s	8s	9s

La detección de ráfagas de viento se realiza mediante un código detector programado en el software Matlab®, que consiste, en detectar los dos tipos de ráfagas EOG y ECG, asimismo, detectan el periodo de la ráfaga. En la figura 8, se observa diferentes colores, que se refiere a la duración de las ráfagas de acuerdo a la tabla 1. Asimismo, las ráfagas EOG se distinguen con la forma de asteriscos, en cambio las ráfagas ECG están en forma de círculos.

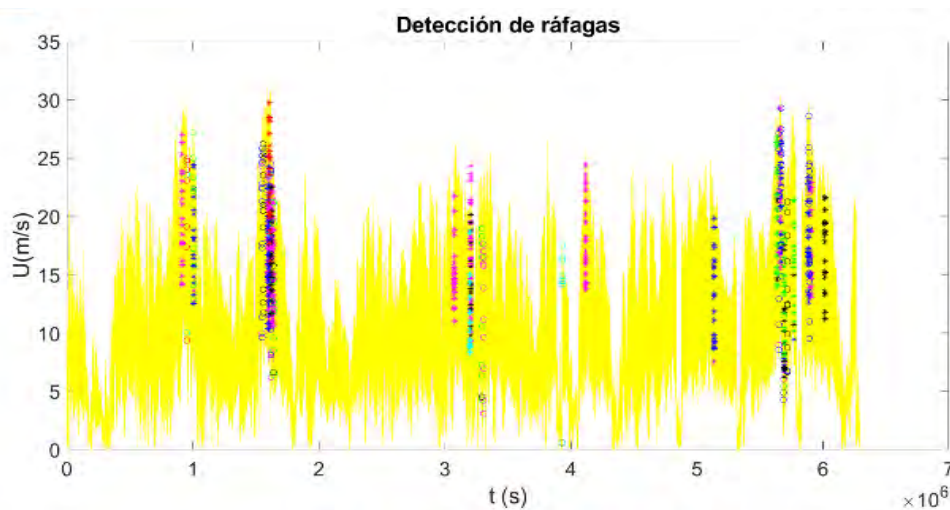


Figura 8. Ráfagas detectadas

Para poder simular las ráfagas en PSIM, se utilizó los parámetros del rotor eólico y de la máquina de 19 kW, estos datos se obtuvieron de un ejemplo del software PSIM.

Tabla 2. Parámetros de la máquina de 19 kW

Parámetros	Máquina 19 kW
<i>Rs</i> (resistencia del estator)	1 mΩ
Inductancia en <i>d</i>	1 mH
Inductancia en <i>q</i>	1 mH
Valor que se obtiene de un experimento	7112
No. de polos <i>P</i>	30
Momento de inercia	100 m
Constante del tiempo del eje	1

Tabla 3. Parámetros del rotor eólico.

Parámetros	Rotor eólico
Potencia de salida nominal	19 kW
Velocidad base del viento	12 m/s
Velocidad de rotacional base	190 rpm
Velocidad inicial rotacional	50 m/s
Momento de inercia	1 m

En la figura 9, se muestra la estructura del aerogenerador aislado utilizado, el cual se compone por un rotor eólico, un generador de imanes permanentes, un convertidor electrónico de potencia espalda con espalda de dos niveles de escala completa y se puede observar que no se aplica ninguna estrategia de control, es decir, se encuentra en lazo abierto.

De igual manera, en esta estructura se obtienen los parámetros analizados, la potencia en una línea que ingresa al convertidor de lado de la máquina, el voltaje drenaje-fuente de un interruptor del lado de la máquina y la corriente de un interruptor de potencia en el convertidor de lado de la máquina y de lado de la red.

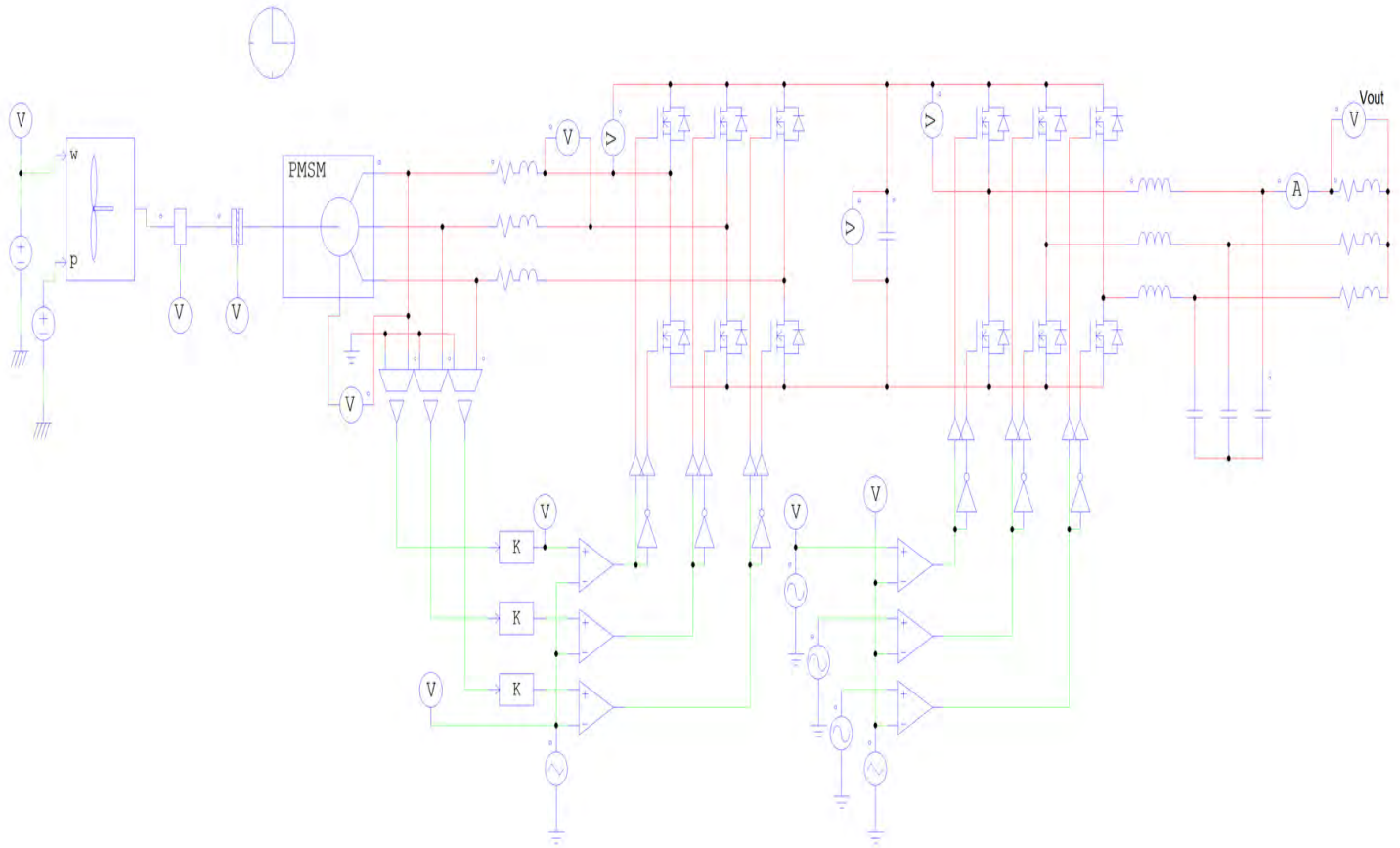


Figura 9. Estructura simulación ráfaga

Las ráfagas extremas máximas EOG y ECG, que se utilizaron para la simulación, se muestra a continuación en la tabla 4, de acuerdo a la clasificación dicha anteriormente

Tabla 4. Ráfagas extremas.

Clasificación	Ráfagas EOG	Ráfagas ECG
Altas	11.4 m/s – 12.1 m/s	16.6 m/s – 18.5 m/s
Medias	10.35 m/s – 11.0 m/s	16.0 m/s – 16.4 m/s
Bajas	9.5 m/s – 10.04 m/s	14.33 m/s – 14.8 m/s

Resultados y Discusión

A continuación, en la tabla 5, se muestra los resultados obtenidos de la simulación con las Ráfagas Extremas de Operación (EOG).

Tabla 5. Resultados de la simulación ráfagas extrema de operación

Parámetro	Nominal				EOG		
	12 m/s	Amp= 12.1 m/s Int= 1.34 m/s ²	Amp= 11.4 m/s Int= 1.425 m/s ²	Amp= 11.0 m/s Int= 1.22 m/s ²	Amp= 10.35 m/s Int= 1.725 m/s ²	Amp= 10.04 m/s Int= 1.1 m/s ²	Amp= 9.5 m/s Int= 1.9 m/s ²
Potencia Pico	3.41 kW	200.99 kW	254.05 kW	107.88 kW	210.91 kW	11.47 kW	8.93 kW
Voltaje Pico	256.81 V	1149.57 V	1557.45 V	899.65 V	1123.5 V	392.19 V	341.35 V
Corriente Pico	28.7 A	253.06 A	268.99 A	175.87 A	230.2 A	68.55 A	59.95 A
Corriente Pico	20.8 A	121.62 A	228.21 A	108.12 A	125.55 A	42.79 A	32.77 A

VOLTAJE DRENAJE-FUENTE DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA EOG V

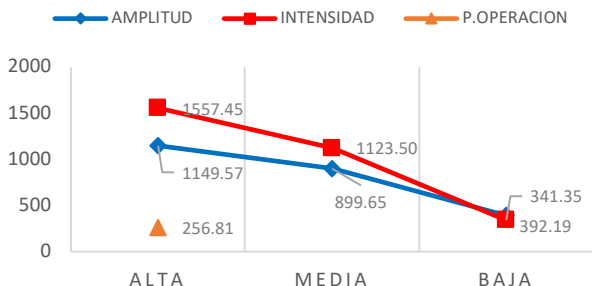


Figura 10. Gráfica potencia amplitud-intensidad

POTENCIA EN UNA LÍNEA QUE INGRESA AL CONVERTIDOR DE LADO DE LA MÁQUINA CLM EOG KW

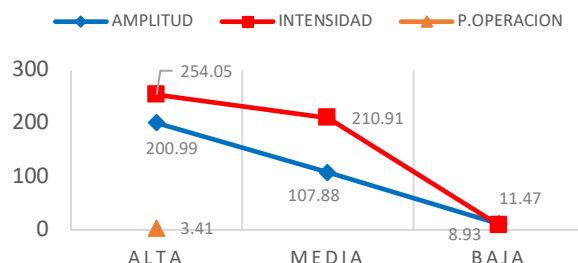


Figura 11. Gráfica voltaje amplitud-intensidad

CORRIENTE EN UN INTERRUPTOR DE POTENCIA EN EL CONVERTIDOR DE LADO DE LA MÁQUINA EOG A

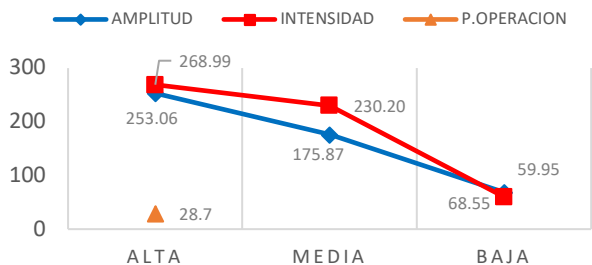


Figura 12. Gráfica corriente máquina amplitud-intensidad

CORRIENTE EN UN INTERRUPTOR DE POTENCIA EN EL CONVERTIDOR DE LADO DE LA RED EOG A

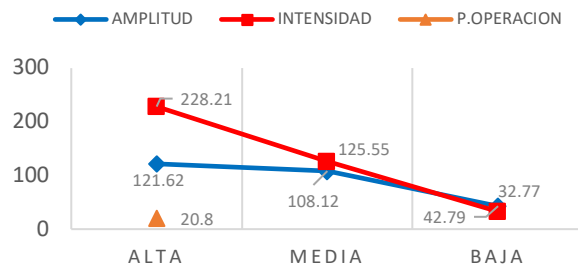


Figura 13. Gráfica corriente red amplitud-intensidad

Las figuras 10, 11, 12 y 13, corresponden a las ráfagas extremas de viento EOG, se observa que en las 4 gráficas respeta un mismo patrón, el cual es que la intensidad resulta ser más preponderante en las ráfagas altas y medias, en cambio, la amplitud, resulta ser más preponderante en las ráfagas bajas.

A continuación, en la tabla 6, se muestra los resultados obtenidos de la simulación con las Ráfagas Extremas Coherentes (ECG).

Tabla 6. Resultados de la simulación ráfagas extremas coherentes.

Parámetro	Nominal				ECG		
	12 m/s	Amp= 18.5 m/s Int= 2.055 m/s ²	Amp= 16.6 m/s Int= 2.075 m/s ²	Amp= 16.4 m/s Int= 2.05 m/s ²	Amp= 16.0 m/s Int= 3.2 m/s ²	Amp= 14.8 m/s Int= 1.64 m/s ²	Amp= 14.3 m/s Int= 2.38 m/s ²
Potencia Pico	3.41 kW	181.12 kW	348.66 kW	313.05 kW	192.47 kW	103.83 kW	310.76 kW
Voltaje Pico	256.81 V	1430.12 V	1749.23 V	1548.12 V	1115.24 V	1018.92 V	1838.06 V
Corriente Pico	28.7 A	267.32 A	314.18 A	304.94 A	226.43 A	200.47 A	337.17 A
Corriente Pico	20.8 A	210.14 A	242.13 A	191.22 A	127.4 A	99.12 A	196.34 A

POTENCIA EN UNA LÍNEA QUE INGRESA AL CONVERTIDOR DE LADO DE LA MÁQUINA CLM ECG KW

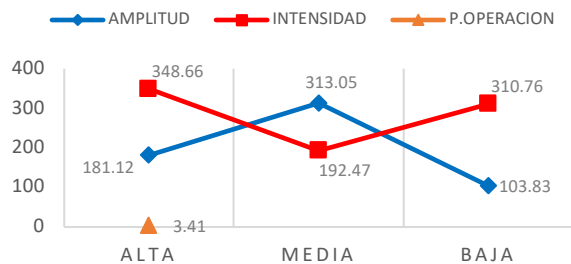


Figura 14. Gráfica potencia amplitud-intensidad

VOLTAJE DRENAJE-FUENTE DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA ECG V

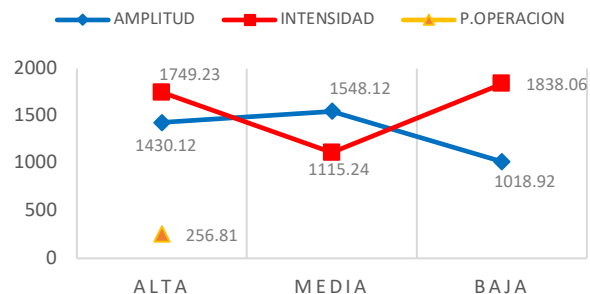


Figura 15. Gráfica voltaje amplitud-intensidad

CORRIENTE DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA EN EL CONVERTIDOR DE LADO DE LA MÁQUINA ECG A

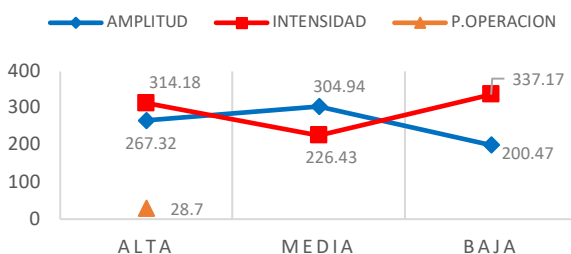


Figura 16. Gráfica corriente máquina amplitud-intensidad

CORRIENTE DE UN INTERRUPTOR DE POTENCIA EN EL CONVERTIDOR DE LA RED ECG A

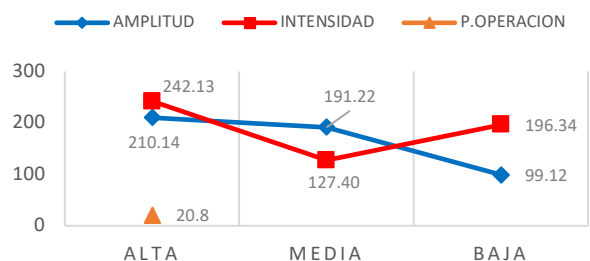


Figura 17. Gráfica corriente red amplitud-intensidad

Las figuras 14, 15, 16 y 17, corresponden a las ráfagas extremas de viento ECG, se aprecia que en las 4 gráficas respeta un mismo patrón, la intensidad resulta ser más preponderante en las ráfagas altas y bajas, en cambio, la amplitud resulta ser más preponderante en las ráfagas medias.

En las tablas 5 y 6, se encuentran los resultados obtenidos de la simulación de las diferentes ráfagas analizadas. Están divididas en colores, el color verde corresponde a las ráfagas altas, el color azul a las medias y el color rojo, a las ráfagas bajas. El recuadro de color fucsia, se refiere al valor nominal. El objetivo de este trabajo, fue determinar si la amplitud o la intensidad causaban un impacto mayor negativo en el convertidor electrónico de potencia. Así también, se aprecia que la condición de cada par se cumple.

Las ráfagas EOG muestran un patrón donde la intensidad es más preponderante en las ráfagas altas y medias, en las ráfagas bajas la amplitud resulta ser más preponderante. En cambio, en las ráfagas ECG las ráfagas altas y bajas la intensidad resulta más preponderante, y las ráfagas medias la amplitud resulta ser más preponderante.

Conclusiones

En este artículo, se realizó el análisis de las ráfagas de viento extremas, donde se determinaron dos tipos de ráfagas, la Ráfaga Extrema de Operación (EOG) y la Ráfaga Extrema Coherente (ECG), el criterio de clasificación fue de acuerdo a la literatura. Así como también, fue propuesto un método de detección de ráfagas de viento, que es capaz de detectar cualquier amplitud de ráfagas, así como su intensidad de la misma. Además, las ráfagas de viento extremas coherente constituyen al 91% de las ráfagas detectadas de la base de datos. Finalmente, la intensidad de la ráfaga de viento se mostró como el parámetro más relevante comparado con la amplitud de la ráfaga de viento en cuanto al envejecimiento o daño del convertidor de potencia.

Bibliografía

- Abulanwar, S., Ghanem, A., Rizk, M., & Hu, W. (2019). A proposed flicker mitigation scheme of DFIG in weak distribution networks. *Alexandria Engineering* , 677-687.
- Alaboudy, K., Daoud, A., Desouky, S., & Salem, A. (2012). Converter controls and flicker study of PMSG based grid connected wind turbines. *Ain Shams Engineering*.
- Branlard, E. (2009). *Wind energy: On the statistics of gust and their propagaton thorough a wind farm*. Páises Bajos.
- Ezhiljenekha, G., & MarsaleinBerno, M. (2020). Review of Power Quality Issues in Solar and Wind Energy . *Materials Today* , 2137-2143.
- Fuladi, M., & Akbari, F. A. (2016). Recognition and assessment of different factors which affect flicker in wind turbines. *Renewable Power Generation*.
- Guerrón, G., García, T., & Montero, I. (2014). Influencia de ráfagas de viento en la calidad de energía de parques eólicos. *Enfoque UTE. Internationale, N.* (2013). International Standard Norme internationale. *International Standard Norme internationale IEC61400-2*.
- Ortea. (15 de Mayo de 2015). *Ortea*. Obtenido de <https://www.next.ortea.com/es/blog-las-3-razones-principales-de-una-baja-calidad-de-energia.html>
- Saad, M., Mohd, S., & Fadhli, M. (2018). Power generation of small wind turbine: Under high-speed operation. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 1-5.