

Análisis de propagación de armónicas en una Microrred Híbrida con inyección de Energía Eólica

Christian René Jiménez Román ^{1,*}, Emmanuel Hernández Mayoral ¹, Omar Rodríguez Rivera¹, Carlos Damián Aguilar Gómez ² y Juan David Rodríguez Romero ¹

¹ Departamento de Energía Eólica, Instituto de Energías Renovables, UNAM, Temixco, Morelos, México

² Departamento de Energías Renovables, Universidad Politécnica de Chiapas, Suchiapa, Chiapas, México

* Autor de correspondencia: criiro@ier.unam.mx

Energías Renovables. Ponencia Presencial.

Recibido: 19 de junio de 2023

Aceptado: 18 de septiembre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

Resumen: Este estudio se centra en el análisis de la propagación armónica en microrredes híbridas a través de simulaciones. Las microrredes híbridas, que comprenden cargas desequilibradas, no lineales y elementos conectados mediante electrónica de potencia, presentan desafíos significativos en cuanto a la propagación de armónicos. Se desarrolla un modelo en MATLAB/Simulink para representar una microrred híbrida y se realizan simulaciones comparativas en diferentes escenarios. Los resultados revelan problemas de distorsión armónica al conectar un aerogenerador a diferentes nodos del sistema y muestran la configuración óptima entre la microrred y el aerogenerador para reducir la propagación de armónicas. El modelo de simulación propuesto ofrece una herramienta valiosa para el diseño y optimización de microrredes híbridas, con el objetivo de mitigar la propagación armónica y mejorar la calidad de la energía. Este estudio destaca la importancia de abordar la propagación armónica en microrredes híbridas, identificando las fuentes y rutas de propagación, desarrollando estrategias de mitigación. Los hallazgos contribuyen al conocimiento y comprensión de la propagación armónica en microrredes híbridas, promoviendo el desarrollo de sistemas de energía más confiables y de alta calidad. En resumen, este estudio proporciona un análisis detallado de la propagación armónica en microrredes híbridas y resalta la importancia de abordar este fenómeno para lograr un diseño y funcionamiento óptimos de dichas microrredes.

Palabras clave: microrredes; calidad de la energía; armónicas; aerogenerador

Harmonic Propagation Analysis in a Hybrid Microgrid with Wind Energy Injection

Abstract: This study focuses on the analysis of harmonic propagation in hybrid microgrids through simulations. Hybrid microgrids, consisting of unbalanced and nonlinear loads, as well as elements connected through power electronics such as distributed renewable generation and energy storage systems, present significant challenges in terms of harmonic propagation. A MATLAB/Simulink model is developed to represent a hybrid microgrid, and comparative simulations are conducted under different scenarios. The results reveal harmonic distortion issues when connecting a wind turbine to different nodes of the system and shows the optimal point of coupling of wind turbine to reduce the harmonic propagation. The proposed simulation framework provides a valuable tool for designing and optimizing hybrid microgrids to mitigate harmonic propagation and improve power quality. This study highlights the importance of addressing harmonic propagation in hybrid microgrids, identifying sources and propagation paths, and developing mitigation strategies. The findings contribute to the knowledge and understanding of harmonic propagation in hybrid microgrids, promoting the development of more reliable and high-quality energy systems. In summary, this study provides a detailed analysis of harmonic propagation in hybrid microgrids and emphasizes the importance of addressing this phenomenon for achieving optimal design and operation of such microgrids.

Keywords: microgrids; power quality; harmonics; wind turbine

Introducción

En la actualidad, la creciente demanda mundial de energía y los problemas ambientales asociados con el uso de fuentes de generación convencionales han impulsado significativamente la integración de fuentes de energía renovable (FERs) a gran escala en las redes eléctricas existentes (IRENA, 2022; IEA, 2022). Sin embargo, esta integración plantea diversos desafíos operativos, de planificación, comunicación y control, que dificultan la operación confiable y estable de las redes eléctricas (Nguyen *et al.*, 2023; Jimenez Roman *et al.*, 2022). Como resultado, se ha buscado modernizar los sistemas eléctricos convencionales mediante la adopción de redes más flexibles y confiables, que permitan la generación local para satisfacer las demandas locales, reduciendo así las pérdidas en la transmisión. Entre estas redes modernas, destacan las microrredes eléctricas (MRs) (Muhtadi *et al.*, 2021; Phan y Lee, 2019; Jimenez Roman *et al.*, 2021).

El Departamento de Energía de los Estados Unidos define una MR como la combinación de diversas fuentes de generación distribuida, ya sea convencional o renovable, almacenamiento de energía y cargas, que puede operar de forma aislada o conectada a la red (Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2012; Toms y Alzarooni, 2022). En México, la incorporación de nuevas tecnologías para la optimización de la generación y consumo de energía eléctrica ha sido limitada desde sus inicios. Sin embargo, con los cambios introducidos en el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en el marco de la reforma energética de 2014, se han abierto oportunidades para implementar mejores tecnologías en la red tradicional, considerándolo como una renovación del sector energético mediante esquemas de generación distribuida (GD) y MRs (León-Trigo *et al.*, 2019). Aunque se han instalado algunas microrredes en diferentes comunidades rurales en México, permitiendo aprovechar los recursos renovables, no se han explorado ni evaluado a fondo.

En la actualidad, las MRs ofrecen numerosos beneficios económicos y ambientales al integrar fuentes de generación distribuida renovable (FGDR) a diferentes escalas, con mínimas pérdidas y bajos costos de transmisión y distribución. Sin embargo, se enfrentan a desafíos relacionados con la calidad de la energía, la estabilidad y el control (Bhattacharyya *et al.*, 2022; Mohammadi *et al.*, 2022; Saeed *et al.*, 2021). La calidad de la energía es un estándar fundamental que debe cumplirse en la red eléctrica, y las microrredes no son una excepción. De acuerdo con la literatura, los principales problemas de calidad de la energía en las MRs incluyen la distorsión armónica y la estabilización de voltaje (Elmetwaly *et al.*, 2020; Khosravi *et al.*, 2022; Mohammadi *et al.*, 2022). Estos problemas pueden ser causados por la presencia de cargas no lineales, la conexión de convertidores electrónicos de potencia (CEPs) o la variación e intermitencia de las FERs (Elmetwaly *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2018).

Los CEPs, al ser dispositivos no lineales por naturaleza, generan distorsión armónica de alto orden debido a su alta frecuencia de conmutación, lo que resulta en una forma de onda distorsionada (Liu *et al.*, 2019; Bramareswara Rao *et al.*, 2022; Saeed *et al.*, 2021). Las cargas cercanas también pueden perturbar fácilmente la MR. Según se menciona en Liu *et al.*, (2019) y Salehirad y Emamzadeh, (2022), otra fuente de generación de armónicas en la MR ocurre cuando se produce una perturbación en los parámetros de corriente y voltaje al conectar cargas no lineales. Estas cargas generan frecuencias armónicas con órdenes de -5, 7, -11 y 13 veces la frecuencia fundamental en sistemas trifásicos, lo que induce armónicas de la misma frecuencia en el punto de acoplamiento común de la microrred, afectando negativamente la calidad de la energía (Blanco *et al.*, 2019). Además, el aumento de las cargas desbalanceadas y no lineales tiene un impacto en toda la MR y, en casos extremos, puede provocar el colapso de la MR y perturbaciones de voltaje y frecuencia en la red eléctrica convencional (DONG *et al.*, 2018)

En las MRs aisladas, pueden surgir problemas de baja frecuencia y oscilaciones armónicas en los convertidores de potencia basados en el control droop, especialmente cuando se suministra potencia constante a cargas con alta impedancia negativa, lo que las hace más susceptibles a pequeñas perturbaciones (Guo *et al.*, 2023). En (Lin *et al.*, 2023) se menciona el bus de CC de una MR y las corrientes armónicas de bajo orden causadas por los CEP de una fase (2ª armónica), convertidores trifásicos desbalanceados (3ª armónica), cargas no lineales (5ª u 7ª armónica) y rectificadores controlados de n pulsos (armónica $n \pm 1$).

Como se ha mencionado en los trabajos citados anteriormente, la distorsión armónica es uno de los problemas más importantes de calidad de la energía en una MR, debido al aumento de cargas no lineales, el uso de CEPs para la interconexión de FGDRs y un alto nivel de penetración de FER intermitente. Por lo tanto, es de gran importancia desarrollar modelos adecuados y precisos que proporcionen más detalles al representar los elementos que componen las MRs, como los FGDRs y los CEPs, para estudiar la propagación de armónicas.

En este trabajo se presenta una herramienta desarrollada en Matlab/Simulink, empleando un modelo tipo EMT (Electromagnetic Transient), para analizar el impacto de la generación eólica al ser implementada en los diferentes nodos de una microrred híbrida. Este enfoque permite estudiar la propagación de frecuencias armónicas en la microrred, así como el diseño y optimización de controles. El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección II se presenta el modelo de la microrred propuesta y sus componentes; en la sección III se muestran los casos de estudio y los resultados obtenidos de las simulaciones; y finalmente, en la sección IV se presentan las conclusiones.

Materiales y Métodos

Microrred propuesta

La MR propuesta se basa en una red de distribución que consta de 14 líneas de transmisión, 4 transformadores, 5 generadores y 9 cargas (Santos Fuentrefria *et al.*, 2014). En esta MG, se proponen 4 FGDRs y se utiliza un generador como nodo de interconexión a la red convencional, que se considera como una barra infinita y proporciona la potencia necesaria para cubrir la demanda del sistema cuando sea necesario. Se establecen dos niveles de voltaje: 13 kV y 220V, con FGDRs que incluyen sistemas fotovoltaicos (FV), aerogeneradores y sistemas de almacenamiento de energía (BESS, por sus siglas en inglés), cumpliendo todos los requisitos técnicos para ser una MR. El diagrama unifilar del sistema propuesto se muestra en la Figura 1.

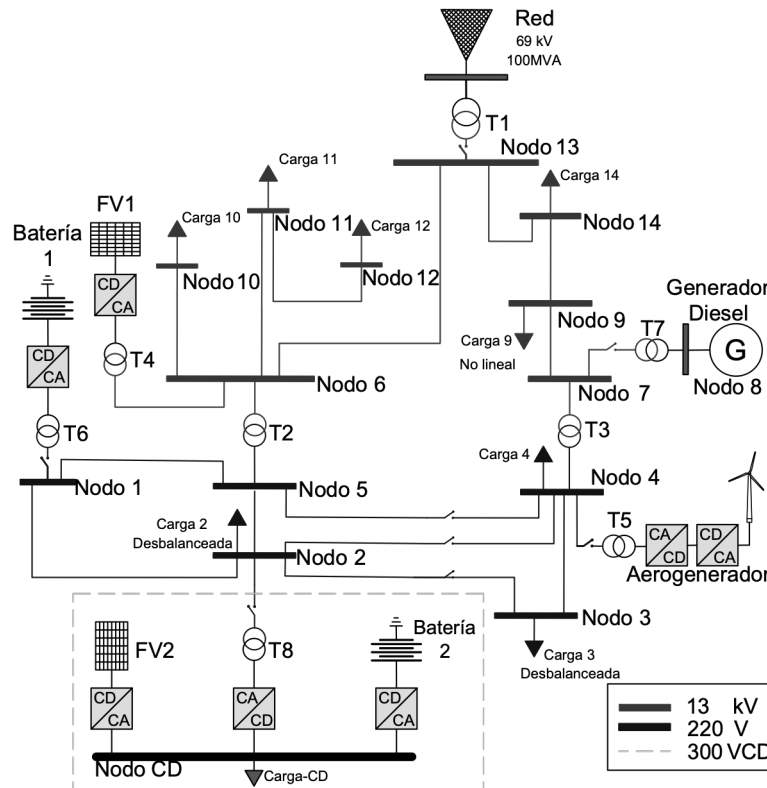


Figura 1. Diagrama unifilar de microrred propuesta.

Sistema Fotovoltaico

En la MR se proponen dos sistemas fotovoltaicos (FV) que han sido modelados en Matlab/Simulink. Estos sistemas operan con una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 25°C . El primer sistema FV consta de 42 módulos que tienen una potencia nominal de 10.5 kW. Estos módulos se conectan a un enlace de corriente continua (DC) a 300 V y $6 \mu\text{F}$. Para su operación, se utiliza un convertidor DC-DC tipo boost con control a lazo cerrado a una frecuencia de conmutación de 5 kHz. Por otro lado, el segundo sistema FV está compuesto por 1750 módulos y tiene una potencia nominal de 725 kW. En este caso, se utiliza un convertidor de potencia con modulación de ancho de pulso senoidal (SPWM, por sus siglas en inglés) de lazo abierto para reducir el voltaje de 480 a 250 VDC. Ambos sistemas FV emplean convertidores electrónicos de potencia (CEPs) como interfaces de interconexión a la MR.

Sistema eólico

En las microrredes de medio y bajo voltaje se utilizan aerogeneradores de velocidad variable, principalmente del tipo IV (Shafiefi *et al.*, 2017). En esta configuración, los convertidores electrónicos de potencia (CEPs) desempeñan un papel crucial al desacoplar el generador eléctrico del sistema al que se interconecta, en este caso, una microrred. En este

estudio, se modela el aerogenerador en Matlab/Simulink, el cual tiene una capacidad de generación de 750 kW a 575 V. Los parámetros empleados se detallan en la Tabla 1. El voltaje y la frecuencia de este aerogenerador pueden ser controlados mediante esquemas de control de modulación de ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) para el convertidor.

Tabla 1. Parámetros del aerogenerador.

Parámetros					
P_m	750	kW	R_s	6.52	$m\Omega$
T_m	318	kN.m	L_s	3.85	mH
V_s	575	(rms, L-L)	Ψ_r	8.53	Wb (pico)
I_s	676	A (rms)	r_i	0.75	MVA
f_s	60	Hz	L_i	0.3368	mH
P_p	26	P_polos	C_{dc}	16174	μF
n_m	22.5	rpm	V_{dc}^*	1220	V

Sistema de almacenamiento de energía

El BESS desempeña un papel fundamental en la microrred al permitir la flexibilización de la red en situaciones de contingencia o durante la transición al modo aislado. Este sistema está compuesto por bancos de baterías que se utilizan para almacenar y suministrar energía durante los procesos de carga y descarga. En la microrred, se implementan dos sistemas de almacenamiento de energía (BESS): uno en la red de corriente continua (DC) y otro en la red de corriente alterna (AC) de baja tensión. El BESS 1 está compuesto por un banco de baterías de iones de litio con una capacidad promedio de 800 Ah y una tensión de 120 V. Por otro lado, el BESS 2 consiste en un banco de baterías de hidruro metálico de níquel (Ni-MH) con una capacidad promedio de 1.5 Ah y una tensión de 650 V. Ambos sistemas BESS se conectan a la microrred a través de convertidores electrónicos de potencia.

Cargas

Las cargas utilizadas en la microrred propuesta se modelan como impedancias complejas, que incluyen cargas lineales balanceadas y desbalanceadas, descritas con su factor de potencia y porcentaje de desbalanceo en la Tabla 2.

a) Cargas lineales desbalanceadas:

Las cargas conectadas a los nodos 2 y 3 contienen componentes de fase que afectan la simetría del voltaje y la corriente en la microrred. El porcentaje de desbalanceo se calcula a partir de la desviación estándar máxima de corriente en una fase en relación con la corriente promedio.

b) Cargas no lineales:

Se modela una carga no lineal en forma de un puente rectificador trifásico SCR que emula un horno de arco industrial. Esta carga está conectada al nodo 9 a medio voltaje. La operación de la carga se controla mediante una estrategia de control PWM de lazo abierto, con una frecuencia de señal portadora de 4080 Hz y un índice de modulación de 0.8. La carga en el bus de CD del puente rectificador es de 1084 ohmios.

Líneas

Los parámetros de las líneas de distribución de la microrred se obtienen a partir de los valores típicos de conductores para los niveles de distribución de medio y bajo voltaje. Para el circuito primario de 13.8 kV, se utiliza un conductor desnudo de cobre calibre 1/0, con una resistencia de línea de 0.394 ohmios/km, una reactancia de línea de 0.1168 ohmios/km y una impedancia de línea de 0.411 ohmios/km. Para el circuito secundario de 220 V, se selecciona un conductor aislado de cobre calibre 4/0, con una resistencia de línea de 0.198 ohmios/km, una reactancia de línea de

0.1089 ohmios/km y una impedancia de línea de 0.227 ohmios/km. En la Tabla 3 se proporcionan más detalles sobre los tramos de línea utilizados y los niveles de tensión.

Tabla 2. Especificaciones de las cargas.

Bus	Voltaje	Tipo de carga	kVA	FP	% Desbalance
2	LV	Desbalanceada	40	0.9	13
3	LV	Desbalanceada	30	0.85	12.6
4	LV	Lineal	50	0.9	0
9	MV	Carga no lineal	320	1	0
10	MV	Lineal	800	0.8	0
11	MV	Lineal	400	0.8	0
12	MV	Lineal	800	0.8	0
14	MV	Lineal	1600	0.8	0
DC	DC	Carga DC	2	1	0

Tabla 3. Nivel de voltaje y distancia de las líneas.

Línea	Nivel de Voltaje	Distancia (KM)	Línea	Nivel de Voltaje	Distancia (KM)
1	LV	0.15	8	MV	2
2	LV	0.2	9	MV	6
3	LV	0.15	10	MV	6
4	LV	0.4	11	MV	3
5	LV	0.4	12	MV	6
6	LV	0.4	13	MV	3
7	LV	0.1	14	MV	2

Transformadores

La microrred propuesta cuenta con 8 transformadores de potencia. Hay un transformador de subestación que conecta la microrred al sistema de subtransmisión de la red eléctrica de 69 kV. Además, se utilizan dos transformadores para reducir el voltaje de uso comercial de 13.8 kV a residencial de 220 V. Los transformadores restantes se emplean para interconectar los CEPs de las FGDR y los BESS. En la Tabla 4 se describe en detalle la configuración y los niveles de tensión de los transformadores utilizados.

Tabla 4. Configuración de los transformadores.

Transformador	Potencia nominal(kVA)	Voltaje ratio
T1 (Grid)	4000	Yg 69000/13800 D1
T2 (MV/LV)	1500	Y 13800/220 Y
T3 (MV/LV)	1500	Y 13800/220 Y
T4 (PV)	1000	Yg 13800/250 D1
T5 (WECS)	1000	Yg 13800/250 D1
T6 (BESS)	55	D1 900/220 Y
T7 (Diesel)	3500	Yg 13800/2400 D1
T8 (MGDC1-2)	15	Y 220/150 Y

Resultados y Discusión

En los resultados presentados de la microrred implementada en Matlab/Simulink, se consideran diferentes casos de estudio en los que se varía el nodo de conexión del aerogenerador dentro de la microrred. El objetivo es determinar

cuáles son los nodos más adecuados para la integración del aerogenerador y aquellos que son vulnerables a la propagación de frecuencias armónicas. Esto se logra mediante el cálculo del índice de distorsión armónica total (THD) de los voltajes medidos en cada nodo de la microrred. El cálculo del THD en cada nodo se realiza utilizando la ecuación 1 y los resultados se muestran en la Figura 2.

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^H (V_{1,h})^2}}{V_{i,1}} * 100 \quad (1)$$

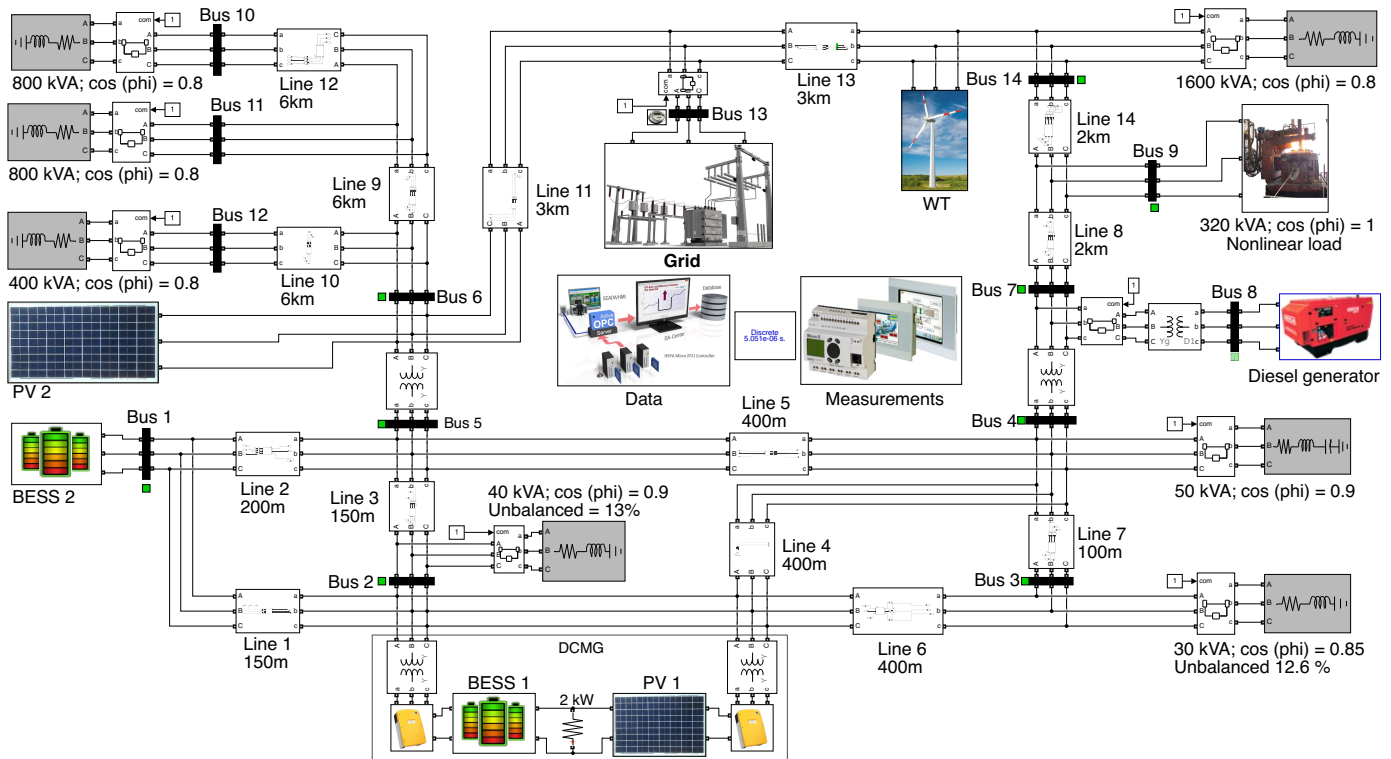


Figura 2. Microrred implementada en Matlab/Simulink.

En este trabajo se presentan tres casos de estudio. El primer caso corresponde a los resultados obtenidos de la microrred sin la presencia del aerogenerador. En el segundo caso de estudio, se conecta el aerogenerador al nodo 13, se escoge el estudio de este nodo ya que es el punto de común acoplamiento entre la MR y la red eléctrica. En el tercer caso de estudio se conecta en el nodo 5, este nodo está situado entre el punto de transferencia de medio y bajo voltaje, además de estar cercano a las demás FGDRs por lo que es interesante estudiar el comportamiento del aerogenerador al conectarse al nodo 5. Todos los casos de estudio se llevan a cabo con la MR conectada a una red eléctrica de distribución de 100 MVA.

Caso de estudio 1:

En el primer caso de estudio, se analiza la operación de la microrred conectada a la red sin la presencia de generación eólica. El tiempo de simulación utilizado es de 0.5 segundos, y el voltaje en el PCC junto con la red se muestra en la Figura 3. Se puede observar una forma de onda senoidal con una baja distorsión. En la Figura 4, se presenta el voltaje en cada bus de la microrred en sistema por unidad (PU). Se observa que los valores de voltaje en los nodos de la microrred se encuentran ligeramente por debajo de la unidad, con una variación del 5 al 10%. El THD (índice de distorsión armónica total) de la microrred en cada nodo se muestra en la Figura 5. Se puede apreciar que los valores de distorsión armónica en la microrred y en el PCC se mantienen por debajo del 5%, cumpliendo así con los parámetros estandarizados de la norma IEEE std. 519-2014.

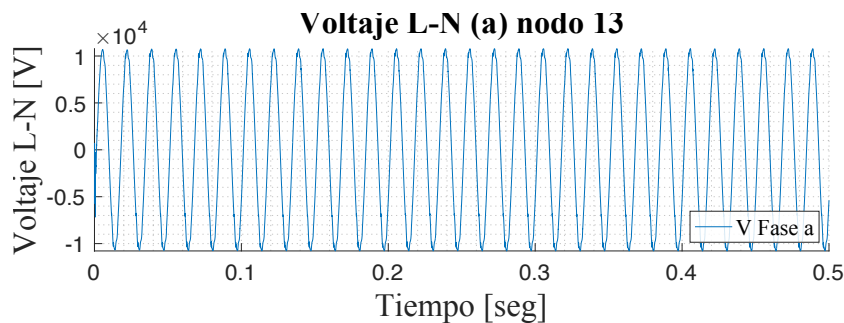


Figura 3. Señal de voltaje de la microrred en el PCC.

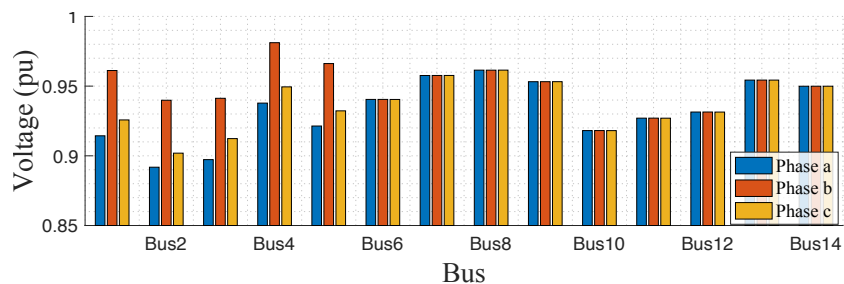


Figura 4. Voltaje en los nodos de la microrred en PU: caso de estudio 1.

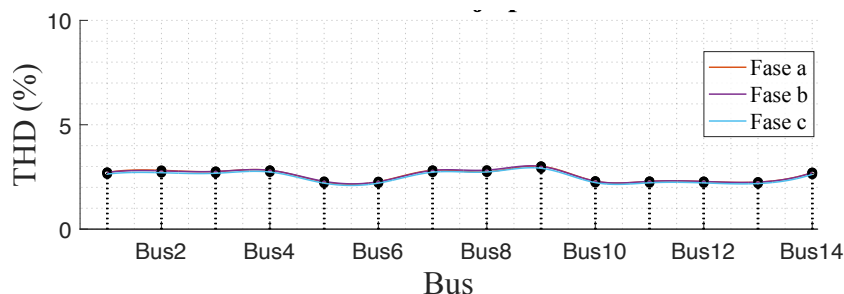


Figura 5. Distorsión armónica total en cada nodo de la microrred: caso de estudio 1.

Caso de estudio 2:

En el segundo caso de estudio, se analiza la conexión del generador distribuido de generación eólica en el nodo 13 de media tensión, mientras la microrred se encuentra conectada a la red. El tiempo de simulación utilizado es de 0.5 segundos. En la Figura 6, se muestra el voltaje en el nodo 14 donde se conecta el aerogenerador a la microrred. Se puede observar una forma de onda senoidal con una alta distorsión armónica. Se aprecia que la forma de onda de voltaje presenta una mayor distorsión en comparación con el primer caso de estudio

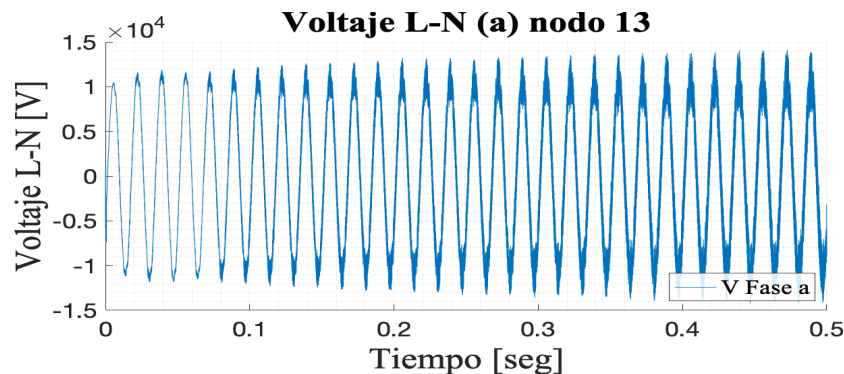


Figura 6. Señal de voltaje de la microrred en el nodo 13; caso de estudio 2.

En la Figura 7, se presenta el voltaje en cada nodo de la microrred en sistema por unidad (PU). Se observa que al conectar el aerogenerador en la red de media tensión, los valores de voltaje en los nodos de la microrred incrementan, alcanzando la unidad en algunos nodos y en otros superando hasta un 10% más de la unidad.

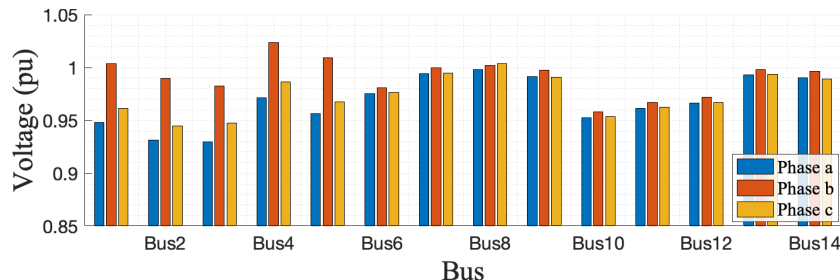


Figura 7. Voltaje en los nodos de la microrred en PU: caso de estudio 2.

El THD de voltaje en los nodos se muestra en la Figura 8. Se puede apreciar un aumento del THD en todos los nodos cuando se conecta el aerogenerador, siendo el nodo 2 el que presenta un pico de hasta un 50% de distorsión armónica.

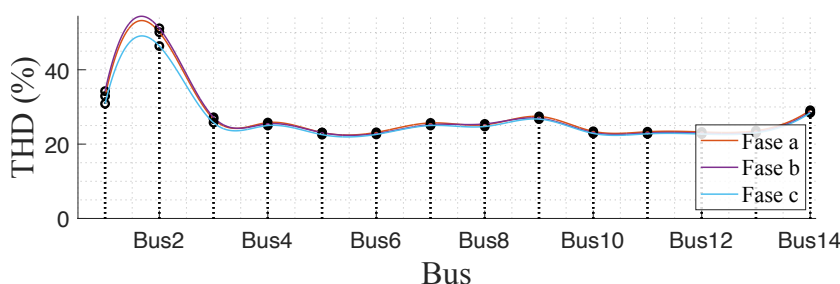


Figura 8. Distorsión armónica total en cada nodo de la microrred: caso de estudio 2.

Caso de estudio 3:

Para el tercer caso de estudio, se aplican las mismas condiciones de operación que en el caso dos, donde el aerogenerador se conecta en el nodo 5 de baja tensión. El voltaje medido en el nodo 5 se muestra en la Figura 9, donde se puede observar una distorsión armónica en la forma de onda del voltaje

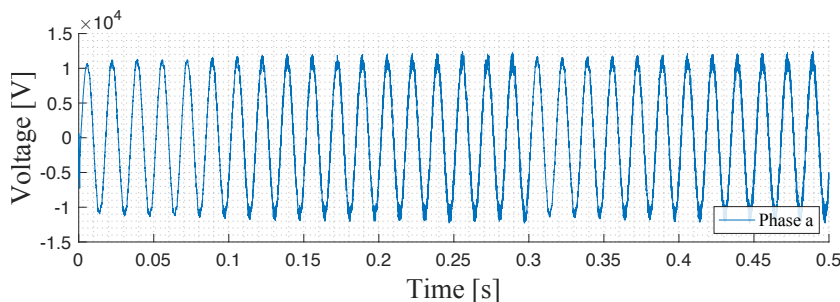


Figura 9. Señal de voltaje de la microrred en el nodo 5; caso de estudio 3.

En los voltajes PU de los nodos de la microrred, que se presentan en la Figura 10, se observa que los niveles se mantienen por debajo de la unidad en aproximadamente un 5%.

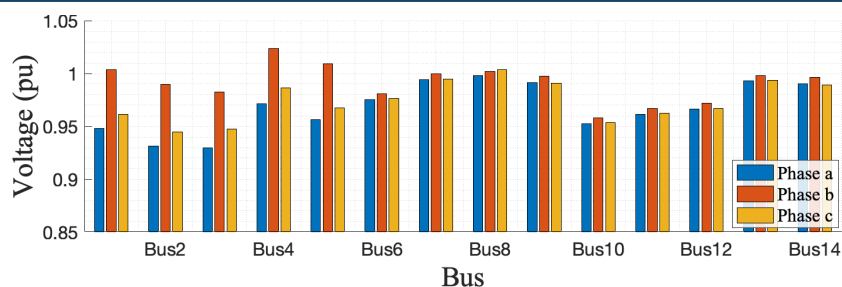


Figura 10. Voltaje en los nodos de la microrred en PU: caso de estudio 3

En cuanto al THD de los nodos, que se muestra en la Figura 11, se observa una disminución en la propagación de frecuencias armónicas en la microrred en comparación con el caso de estudio 2.

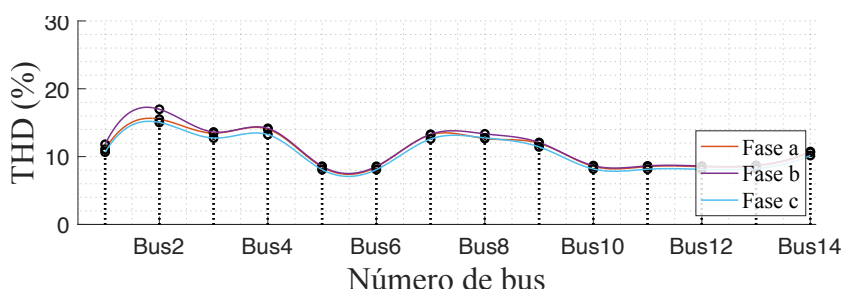


Figura 11. Distorsión armónica total en cada nodo de la microrred: caso de estudio 3.

Finalmente se resume en la Tabla 5 los valores de THD obtenidos en los nodos para los casos de estudio realizados al cambiar el punto de conexión del aerogenerador en los 14 nodos de la microrred. Se observa que la propagación de armónicas en la microrred es menor en los nodos de baja tensión, siendo los nodos 1 los más afectados en todos los casos. En los casos de los nodos 10, 11 y 12 se presenta un THD elevado en los puntos de conexión del aerogenerador.

Tabla 3. Nivel de voltaje y distancia de las líneas.

THD nodo	WT N1	WT N2	WT N3	WT N4	WT N5	WT N6	WT N7	WT N8	WT N9	WT N10	WT N11	WT N12	WT N13	WT N14
1	23.66	8.80	3.47	3.10	3.10	41.05	30.81	27.30	33.46	30.58	35.74	34.74	33.50	31.55
2	9.53	15.26	4.22	3.11	3.08	59.78	48.21	41.85	52.77	40.92	49.70	46.90	49.23	47.49
3	3.28	4.07	16.95	2.87	2.78	24.48	29.85	26.69	28.11	19.97	21.93	21.80	23.36	25.97
4	2.71	2.78	2.97	2.89	2.79	20.58	30.18	26.91	27.33	17.63	18.83	18.89	21.13	25.05
5	2.50	2.56	2.90	2.99	3.05	32.87	19.10	17.80	20.57	27.57	30.83	31.06	25.63	22.51
6	2.50	2.53	2.92	2.99	3.05	32.70	19.22	17.92	20.63	27.40	30.72	30.94	25.58	22.48
7	2.69	2.74	2.99	2.88	2.78	20.57	30.02	26.74	27.18	17.58	18.86	18.91	21.08	24.89
8	2.58	2.67	2.88	2.89	2.78	20.07	29.62	26.74	27.27	17.64	18.45	18.74	20.53	25.31
9	2.91	2.95	3.19	3.07	2.99	21.93	27.03	24.27	29.04	18.75	20.10	20.15	22.50	26.59
10	2.53	2.56	2.94	3.01	3.07	33.09	19.45	18.14	20.87	58.68	48.34	31.31	25.88	22.74
11	2.52	2.55	2.93	3.00	3.06	32.93	19.36	18.05	20.77	42.54	48.11	31.16	25.76	22.64
12	2.51	2.54	2.93	3.00	3.06	32.86	19.31	18.01	20.73	27.53	30.87	48.54	25.70	22.58
13	2.26	2.29	2.55	2.51	2.48	25.01	19.56	17.74	21.01	21.07	23.34	23.44	26.08	22.91
14	2.65	2.68	2.93	2.84	2.77	23.09	24.06	21.70	25.86	19.62	21.32	21.38	23.85	28.25

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones de los casos de estudio de la microrred propuesta, se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- En los resultados del segundo caso de estudio, donde se conecta un aerogenerador a la red de media tensión, se observa un incremento en los voltajes PU de los nodos, llegando hasta un 10% por encima de la unidad. Además, se registra un aumento en el THD en todos los nodos, siendo los nodos 1 y 2 los más críticos con un THD de 35% y 50% respectivamente.
- Al conectar el aerogenerador a la red de baja tensión, se observa una disminución del THD en los nodos de la microrred en comparación con los casos de media tensión.
- De los 14 casos de estudio realizados, se determina que los nodos más vulnerables a la distorsión armónica con la presencia de generación eólica son los nodos 1 y 2 .
- La conexión óptima del aerogenerador, según los resultados de los casos de estudio, se encuentra en los nodos 4 y 5 de la red de baja tensión, donde se registra una menor propagación de armónicas hacia la microrred.
- Estos hallazgos contribuyen al estudio y comprensión de los efectos de la generación eólica en la calidad del suministro de energía en una microrred, brindando información relevante para el diseño y la operación eficiente de este tipo de sistemas.

Bibliografía

- Chen, C.-I., Chen, Y.-C., Chin, Y.-C., y Chung-Hsien, C. (2018). Integrated Power-Quality Monitoring Mechanism for Microgrid. *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, 9(6), 6877-6885. <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2727527>
- León-Trigo, L., Reyes-Archundia, E., Gutiérrez-Gnecchi, J., Méndez-Patiño, A., y Chávez-Campos, G. (2019). Smart Grids en México: Situación actual, retos y propuesta de implementación. *Ingeniería, investigación y tecnología*, xx(2), 01-12. <https://doi.org/10.22201/ii.25940732e.2019.20n2.015>
- Lin, Z., He, L., Zhou, H., Zhang, J., y Xiong, Z. (2023). NOC-Based Multiple Low-Order Harmonic Currents Suppression Method. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 38(1), 143-150. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3196918>
- Liu, J., Miura, Y., y Ise, T. (2019). Cost-Function-Based Microgrid Decentralized Control of Unbalance and Harmonics for Simultaneous Bus Voltage Compensation and Current Sharing. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, 34(8), 7397-7411. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2879340>
- Department of Energy Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. (2012). *Summary Report: 2012 DOE Microgrid Workshop*.
- Blanco, C., Tardelli, F., Reigosa, D., Zanchetta, P., y Briz, F. (2019). Design of a Cooperative Voltage Harmonic Compensation Strategy for Islanded Microgrids Combining Virtual Admittance and Repetitive Controller. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 55(1), 680-688.
- Bhattacharyya, S., Puchalapalli, S., y Singh, B. (2022). Operation of Grid-Connected PV-Battery-Wind Driven DFIG Based System. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 58(5), 6448-6458. <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3181124>
- Bramareswara Rao, S., Pavan Kumar, Y., Amir, M., y Ahmad, F. (2022). An Adaptive Neuro-Fuzzy Control Strategy for Improved Power Quality in Multi-Microgrid Clusters. *IEEE Access*, 10, 128007-128022. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3226670>
- Dong, H., Yuan, S., Han, Z., Ding, X., Ma, S., y Han, X. (2018). A Comprehensive Strategy for Power Quality Improvement of Multi-Inverter-Based Microgrid With Mixed Loads. *IEEE Access*, 6, 30903-30916. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2826923>
- Elmetwaly, A. H., Eldesouky, A. A., y Sallam, A. A. (2020). An Adaptive D-FACTS for Power Quality Enhancement in an Isolated Microgrid. *IEEE Access*, 8, 57923-57942. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981444>
- Guo, J., Meng, Z., Chen, Y., Wu, W., Liao, S., Xie, Z., y Guerrero, J. (2023). Harmonic Transfer-Function-Based $\alpha\beta$ -Frame SISO Impedance Modeling of Droop Inverters-Based Islanded Microgrid With Unbalanced Loads. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 70(1), 452-464. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3156043>
- IEA. (2022). *Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021. Global emissions rebound sharply to highest ever level*. France.
- IRENA. (2022). *World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5 pathway*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Jimenez Roman, C. R., Hernandez Mayoral, E., y Madrigal Martine., M. (2022). Experimental Comparison of the Different Switching Techniques applied to Back-to-Back Converter connected to DFIG-based Wind Turbine for Harmonic Analysis. *IEEE LAT AM T*, 21(1), 142-150. <https://doi.org/10.1109/TLA.2023.10015136>
- Jimenez Roman, C., Hernandez Mayoral, E., y et al. (2021). Research trend of wind energy applied to microgrids: A bibliometric analysis (2005-2021). *XIX Simposio Internacional de Ingeniería Eléctrica SIE 2021*. Las Villas, Cuba.
- Khosravi, N., Echalih, S., Baghbanzadeh, R., Hekss, Z., Hassani, R., y Messaoudi, M. (2022). Enhancement of power quality issues for a hybrid AC/DC microgrid based on optimization methods. *ET Renewable Power Generation*, 16, 1773-1791 <https://doi.org/10.1049/rpg2.12476>
- Mohammadi, F., Mohammadi-Ivatloo, B., Gharehpetian, G. B., Ali, M. H., Wei, W., Erdinc, O., y Shirkhani, M. (2022). Robust Control Strategies for Microgrids: A Review. *IEEE SYSTEMS JOURNAL*, 16(2), 2401-2412. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3077213>
- Muhtadi, A., Pandit, D., Nguyen, N., y Mitra, J. (2021). Distributed Energy Resources Based Microgrid: Review of Architecture, Control, and Reliability. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, 57(3), 2223-2235. <https://doi.org/10.1109/TIA.2021.3065329>

- Nguyen, T. K., Chang, G. W., Liu, Y. J., y Li, G. Y. (2023). Improving Voltage Ride-Through Capability of Grid-Tied Microgrid With Harmonics Mitigation. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, 38(1), 738-741. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2022.3199081>
- Phan, D. M., y Lee, H. H. (2019). Interlinking Converter to Improve Power Quality in Hybrid AC–DC Microgrids With Nonlinear Loads. *IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS*, 7(3), 1959-1968. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2870741>
- Salehirad, M., y Emamzadeh, M. (2022). Energy management and harmonic compensation of micro-grids via multi-agent systems based on decentralized control architecture. *IET Renewable Power Generation*, 1-19. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12653>
- Saeed, M. H., FANGZONG, W., KALWAR, B. A., y IQBAL, S. (2021). A Review on Microgrids' Challenges y Perspectives. *IEEE Access*, 9, 166502-166518. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3135083>
- Santos Fuentrefria, A., Cairo Rodriguez, D., y Boza Valerino, J. G. (2014). Análisis preliminar del Límite de Potencia Eólica para grandes perturbaciones utilizando aerogeneradores de velocidad fija. *Aplicación de la computación*, (2), 131-140.
- Shafiefi, A., Dehkordi, M., Kiyoumars, A., y Farhangi, S. (2017). A Control Approach for Small - Scale PMSG - based WECS in the Whole Wind Speed Range. *IEEE Trans. Power Electron*, 23(12), 9117-9130. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2655940>
- Toms, A. M., y Alzarooni, A. I. (2022). Design and Control Issues of Microgrids: A Survey. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 09(04).