

## INVERSORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A LA RED ELÉCTRICA PARA ANÁLISIS SUPRA-ARMÓNICO

Hernández-Mayoral, Emmanuel; Dueñas-Reyes, Efraín, Enríquez-Santiago, Jesús A; Martínez-Reyes, Gregorio; Marvens, Jean Pierre; Juárez-Vázquez. Sergio; Ortiz-Jiménez, Iridian G.

SECIHTI adscrito al IER-UNAM, Depto. Energía Eólica, Temixco, Mor. 62580. [emhema@ier.unam.mx](mailto:emhema@ier.unam.mx)  
Universidad del Istmo campus Tehuantepec, Depto. Energía Eólica, Oaxaca, 70760. [mc\\_efdure@live.com.mx](mailto:mc_efdure@live.com.mx)  
UNISTMO campus Tehuantepec, Depto. Energía Eólica, Oaxaca, 70760. [ing.jesusantonio@hotmail.com](mailto:ing.jesusantonio@hotmail.com)  
Universidad del Istmo campus Tehuantepec, Depto. Energía Eólica, Oaxaca, 70760. [mrg.23@hotmail.com](mailto:mrg.23@hotmail.com)  
Instituto de Energías Renovables-UNAM, Depto. Energ. Eólica, Temixco, Mor. 62580. [majepi@ier.unam.mx](mailto:majepi@ier.unam.mx)  
Universidad del Istmo, Depto. Ing. en Computación, Oaxaca, 70760. [sjuarez@sandunga.unistmo.edu.mx](mailto:sjuarez@sandunga.unistmo.edu.mx)  
UNISTMO campus Tehuantepec, Depto. Energía Eólica, Oaxaca, 70760. [iridianortiz98@gmail.com](mailto:iridianortiz98@gmail.com)

\*Autor de Correspondencia: Hernández-Mayoral, Emmanuel. [emhema@ier.unam.mx](mailto:emhema@ier.unam.mx)

### RESUMEN

Las emisiones de alta frecuencia, conocidas como supraarmónicas, proliferan en las redes de baja y media tensión debido al creciente uso de tecnologías que generan distorsiones en el rango de 2 kHz a 150 kHz. Las consecuencias de este fenómeno son interferencias con los componentes de la fuente de alimentación y los equipos del usuario final. Por lo tanto, es imperativo establecer directrices y normativas que limiten la cantidad de emisiones supraarmónicas que se inyectan en la red eléctrica provenientes de los sistemas fotovoltaicos (SFVs) en el contexto del cambio climático. El objetivo de este trabajo es analizar las emisiones de dos inversores FVs presentes en una red eléctrica. Este estudio además examina señales reales de SFVs, que presentan emisiones de banda estrecha, banda ancha y variables en el tiempo. Este artículo concluye enfatizando la necesidad de regulaciones específicas para altas frecuencia, a la vez que proporciona indicaciones para futuras investigaciones.

### ABSTRACT

High-frequency emissions, known as supraharmonics, are proliferating in low- and medium-voltage grids due to the increasing use of technologies that generate distortions in the 2 kHz–150 kHz range. The consequences of this phenomenon are interference with power supply components and end-user equipment. Therefore, it is imperative to establish guidelines and regulations that limit the amount of supraharmonics emissions injected into the electrical grid from photovoltaic systems (PVs) in the context of climate change. The objective of this work is to analyze the emissions of two PV inverters present in a power grid. This study also examines real PVs signals, which present narrowband, broadband, and time-varying emissions. This article concludes by emphasizing the need for specific regulations for high frequencies, while providing directions for future research.

**Keywords:** calidad de la energía, supra-armónicas, emisiones de alta frecuencia, intermodulación y propagación.

### INTRODUCCIÓN

La integración de SFVs en las redes eléctricas se ha vuelto cada vez más frecuente, impulsada por la creciente demanda de fuentes de energía renovables (FERs). Sin embargo, la integración de estos sistemas puede introducir diversos problemas de calidad de la energía, incluida la inyección de emisiones supra-armónicas en la red. Éstas son definidas como componentes de frecuencia superiores a 2 kHz, las cuáles pueden tener un impacto significativo en el funcionamiento y la estabilidad de las redes eléctricas [1].

Actualmente, existen estudios que analizan las emisiones supra-armónicas, por ejemplo, en [2] se realizó un estudio en el que se destacó la posibilidad de que los equipos de electrónica de potencia introduzcan perturbaciones electromagnéticas, por lo que es imperativa la necesidad de soluciones técnicas eficaces para mitigar estos problemas. La interconexión segura de los SFVs a la red eléctrica requiere el estricto cumplimiento de normas como la serie IEC 61000, IEEE-519 [3] o IEEE-1547 [4], limitando así el nivel de penetración del SFV en la red para garantizar la estabilidad y la calidad del suministro eléctrico.

Anteriormente, la conversión de CD a CA y viceversa se realizaba predominantemente mediante electrónica de potencia pasiva, con convertidores que utilizaban diodos o tiristores. Este enfoque generaba importantes emisiones armónicas en el rango de frecuencia de hasta 2 kHz. Sin embargo, los avances tecnológicos han introducido materiales como el carburo de silicio y el nitruro de galio en interruptores de electrónica de potencia, como los IGBT y MOSFET, lo que permite un aumento sustancial de la eficiencia de conversión. Si bien estas tecnologías producen una menor distorsión armónica a frecuencias de hasta 2 kHz, se observan mayores distorsiones a frecuencias más altas (>2 kHz) debido a las altas frecuencias de conmutación involucradas [5].

Las emisiones supraarmónicas resultantes de las frecuencias de conmutación son causadas por la modulación PWM, y estas emisiones son visibles en el espectro de frecuencias y sus múltiplos [6].

Al analizar, por ejemplo, la interacción de las emisiones supraarmónicas entre un inversor FV y un vehículo eléctrico, se observa un fenómeno ampliamente investigado en la literatura, especialmente en el ámbito de las telecomunicaciones, conocido como distorsión de intermodulación [7]. Como resultado de la interacción entre las diferentes frecuencias de conmutación de los dispositivos involucrados, la distorsión de intermodulación se convierte en un problema crítico ya que introduce nuevos componentes de frecuencia en la red, lo que aumenta el potencial de interferencia con los dispositivos conectados y requiere un análisis riguroso para garantizar la estabilidad y el funcionamiento eficaz del sistema energético. Para esto, es importante mencionar que para la distorsión armónica en redes de baja tensión, los estándares están actualmente en revisión por el Grupo de Trabajo 8 del IEC SC77A [8].

Este artículo se estructura de la siguiente manera: en Sección 2 se presenta un modelo simplificado de las emisiones supraarmónicas producidas en SFVs, incluyendo un índice para evaluar la calidad de la energía y una breve descripción de las normas existentes para la medición de supraarmónicas. Sección 3 describe la red eléctrica en estudio, la metodología y los equipos utilizados. Sección 4 presenta los principales resultados obtenidos, discutiendo los puntos clave de acuerdo con los hallazgos. Finalmente, Sección 5 describe las principales conclusiones del artículo y el trabajo futuro.

## 2. EMISIONES SUPRA-ARMÓNICAS

Las supraarmónicas denotan señales eléctricas presentes en sistemas eléctricos de potencia (SEPs) a frecuencias superiores al rango armónico típico, específicamente entre 2 kHz y 150 kHz. Se trata de perturbaciones de alta frecuencia que pueden surgir de la electrónica de potencia moderna, las fuentes de energía renovables u otras cargas no-lineales. El fundamento matemático de las supraarmónicas abarca varias áreas clave, principalmente enraizadas en el procesamiento de señales, el análisis de Fourier y la teoría de SEP. En el núcleo del análisis de las supraarmónicas se encuentra el concepto de análisis de Fourier, que permite la descomposición de cualquier señal periódica en sus componentes senoidales. El análisis armónico tradicional se centra en múltiplos de la frecuencia fundamental (p. ej., 50 Hz o 60 Hz en SEPs), pero en el caso de las supraarmónicas, el análisis se extiende a frecuencias más altas. Para señales periódicas, se utiliza la serie de Fourier para expresar la señal como la suma de senos y cosenos. Dada una función periódica  $f(t)$  con período  $T$ , se puede expresar mediante (1) [9].

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + b_n \sin \frac{2\pi n t}{T} \right) \quad (1)$$

donde  $a_0$  es el componente constante (CD), que representa el valor promedio de la función durante un período. Los términos  $a_n$  y  $b_n$  son los coeficientes de Fourier, que representan las amplitudes de los diferentes componentes de frecuencia. Ahora, dado que las señales supra-armónicas suelen analizarse digitalmente, el teorema de muestreo desempeña un papel importante. El criterio de Nyquist establece que para capturar todos los componentes de frecuencia de una señal sin solapamiento, la frecuencia de muestreo  $f_s$  debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima de interés  $f_{max}$ , que se obtiene mediante (2).

$$f_s \geq 2 \cdot f_{max} \quad (2)$$

Para el análisis supra-armónico, donde las frecuencias alcanzan los 150 kHz, la frecuencia mínima de muestreo debe ser superior a 300 kHz para garantizar una representación precisa de la señal. Al analizar las emisiones supra-armónicas, es fundamental distinguir claramente entre emisiones primarias y secundarias. Al medir las emisiones supra-armónicas de un dispositivo eléctrico en un punto de acoplamiento común (PCC), siempre se mide la suma de las emisiones primarias y secundarias [10]. Esta diferenciación es crucial para identificar la fuente de las emisiones, ya sea del dispositivo en prueba o de fuentes externas, lo cual es esencial para la correcta asignación de responsabilidades. Sin embargo, este proceso presenta una complejidad considerable, ya que a menudo no es factible aislar un solo dispositivo para determinar sus emisiones primarias, ya sea en condiciones de laboratorio o en mediciones de campo. Un modelo teórico simplificado para facilitar la comprensión de las emisiones primarias y secundarias consiste en representar las supraarmónicas de un dispositivo, como un SFV, o como una fuente constante de corriente supra-armónica acompañada de una impedancia interna, que absorbe una parte de las emisiones. En este contexto, la emisión primaria se distribuye parcialmente a través de la red eléctrica, mientras que una fracción adicional pasa a través de la impedancia asociada a otro dispositivo conectado en las proximidades. Por lo tanto, la emisión total del segundo dispositivo estará compuesta tanto por sus emisiones primarias como por las emisiones secundarias derivadas del primero. Las emisiones de la red pueden representarse adecuadamente mediante una fuente de voltaje, que crea una corriente a través de la impedancia [11].

### 2.1. Efectos de las Emisiones Supra-armónicas

Las emisiones supraarmónicas se han convertido en un problema importante para la calidad de la energía debido al creciente uso de la electrónica de potencia en las redes modernas [12]. Estas emisiones pueden causar diversos efectos negativos, como la pérdida de potencia, el calentamiento de los elementos de la red, el envejecimiento de los materiales dieléctricos y la interferencia

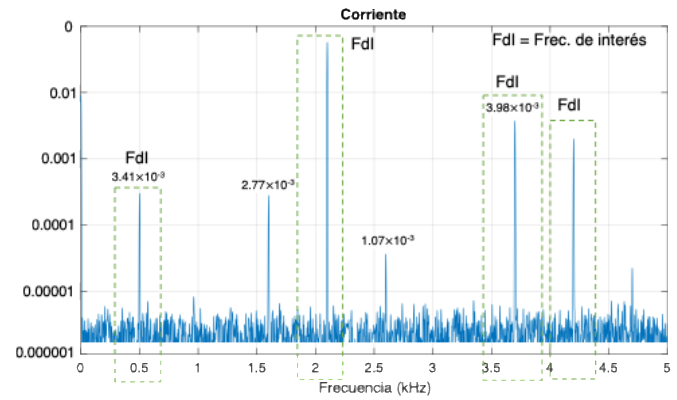
con los equipos y la comunicación por línea eléctrica [13]. Las supra-armónicas pueden provocar fallas en el funcionamiento de los circuitos de control, afectar la intensidad de las lámparas LED y acelerar el envejecimiento de los capacitores, transformadores y máquinas rotativas. Para abordar estos problemas, la comunidad científica se ha centrado en el desarrollo de métodos para identificar, medir y mitigar las emisiones supra-armónicas, así como en el establecimiento de nuevos estándares [14]. Sin embargo, se necesita más investigación para mejorar las estrategias de mitigación y las técnicas de medición de las supra-armónicas. El efecto pelicular es una de las principales preocupaciones, la cuál provoca que la corriente en buenos conductores se concentre más en la superficie a medida que aumenta la frecuencia, reduciendo el área efectiva de conducción. Esto aumenta la resistencia eléctrica y provoca un mayor calentamiento en los cables y componentes del SEP. Además del mencionado aumento térmico en los componentes, se observan efectos adicionales, como emisiones sonoras perceptibles (de 20 Hz a 20 kHz, el rango auditivo humano) y el mal funcionamiento de los equipos, incluidos los sistemas de comunicación PLC [15]. Para evaluar la emisión total de supra-armónicas ( $TSHC_w$ ), en analogía con la corriente armónica total, la  $TSHC_w$  se define mediante (3):

$$TSHC_w = \sqrt{\sum_{n=1}^n SH_{bin,n}^2 \cdot w_n} \quad (3)$$

Esta evaluación emplea un enfoque en el dominio de la frecuencia, donde  $SH_{bin,n}$  representa la amplitud de cada intervalo de frecuencia, agrupando las bandas de 2 a 150 kHz y, posteriormente, comparando estas bandas con las zonas de riesgo, considerando las frecuencias más dañinas y asignando los pesos correspondientes a estas zonas, definidas como  $w_n$ . Al analizar el espectro de emisión de alta frecuencia, se observa la presencia de emisiones tanto de banda ancha como de banda estrecha.

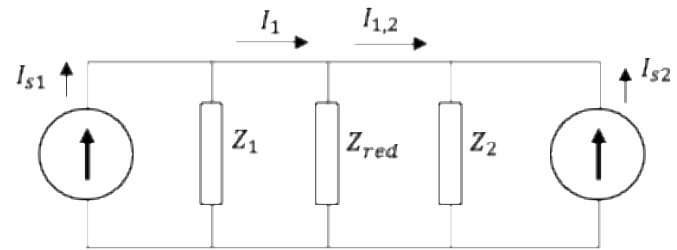
## 2.2. Medición de las Emisiones Supra-armónicas

En el análisis de la Figura 1, que ilustra el espectro de frecuencias de una de las mediciones realizadas y se observa la presencia de emisiones en el rango de 2 a 150 kHz. Es importante destacar que, en el contexto de las emisiones supra-armónicas, no se observan componentes aislados, como suelen identificarse con las armónicas. En cambio, estas emisiones suelen manifestarse como un rango o incluso como un conjunto de componentes, cuya amplitud no es fija y puede variar considerablemente con el tiempo, lo que dificulta la predicción previa. Al analizar las emisiones supra-armónicas, es fundamental distinguir claramente entre emisiones primarias y secundarias.



**Figura 1.** Representación de las bandas de emisión supraarmónicas en un SEP.

Esta distinción es crucial para identificar la fuente de las emisiones, ya sea que provengan del equipo en prueba o de fuentes externas, lo cual es esencial para la correcta atribución de responsabilidades. Se ha propuesto un modelo teórico simplificado para comprender las emisiones primarias y secundarias, como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Modelo simplificado para la caracterización de las emisiones primarias y secundarias de un equipo.

En este diagrama representativo, el equipo 1 se representa como una fuente constante de corriente supraarmónica, denotada como  $I_{s1}$ , acompañada de una impedancia interna,  $Z_1$ , que actúa para absorber parte de las emisiones. Esta configuración da como resultado las emisiones primarias del equipo 1, denotadas como  $I_1$ , como se describe en (4):

$$I_1 = I_{s1} \frac{Z_1}{Z_{red} + Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

donde  $Z_1$  y  $Z_2$  son las impedancias internas de los equipos 1 y 2, respectivamente, y  $Z_{red}$  es la impedancia de la red; la emisión primaria ( $I_1$ ) se distribuye parcialmente a través de la red eléctrica, mientras que una fracción adicional fluye a través de la impedancia asociada al equipo 2, como se describe en la (5)

$$I_{1,2} = I_1 \frac{Z_{red}}{Z_{red} + Z_2} \quad (5)$$

donde  $I_{1,2}$  es la emisión del equipo 2 proveniente del equipo 1.

Siguiendo el procedimiento descrito en (4), es posible determinar las emisiones primarias del equipo 2. Sin embargo, la emisión total del equipo 2 será la integración de su emisión primaria ( $I_2$ ) y la emisión secundaria del equipo 1.

Las emisiones totales del equipo 1 incluyen una fracción de las emisiones del equipo 2 que pasan a través de su impedancia interna  $Z_I$ . Además, resulta difícil determinar las emisiones primarias de un dispositivo cuando no está conectado a una red sin perturbaciones, y a menudo resulta impráctico aislar un solo dispositivo para determinar sus emisiones primarias, como se observó durante las mediciones.

### 2.3. Impacto de las Emisiones Supra-armónicas en los Dispositivos y Equipos conectados a la Red Eléctrica

El impacto supra-armónico en los dispositivos conectados a la red eléctrica difiere en todas las frecuencias dentro del rango de frecuencias supra-armónicas, de 2 a 150 kHz. En algunas frecuencias, el impacto puede ser más sensible o crítico que en otras. Depende de la impedancia de entrada del dispositivo. Si la impedancia de entrada es baja, podría circular una corriente alta, que fluye principalmente a través del capacitor del lado de CA, lo que puede causar un calentamiento adicional que afecta al capacitor electrolítico. La impedancia del capacitor disminuye con la frecuencia más alta, y el impacto depende de la frecuencia. Esto se puede explicar por las altas frecuencias y voltajes en la red y por la baja impedancia del dispositivo. La frecuencia en sí no causa daños a los dispositivos, pero el voltaje a dicha frecuencia genera interferencias en sus componentes. Además, según los niveles de compatibilidad sugeridos en la norma IEC 61000-2-2, los límites de voltaje son mayores para los supra-armónicos de baja frecuencia que para los de alta frecuencia.

Como ya se mencionó, las supra-armónicas pueden reducir la vida útil del dispositivo debido a la sobrecarga de las fuentes de alimentación conmutadas. Si el voltaje en la red principal es mayor que el voltaje residual en el capacitor, entonces los diodos conmutan. Con las supra-armónicas, la fuente de alimentación conmutada absorbe una corriente mayor, lo que implica mayores pérdidas, mayor calor y una vida útil más corta.

Si el voltaje en la red principal aumenta, también lo hará el voltaje a través del capacitor. El diodo conmuta y el capacitor recibe toda la frecuencia y el voltaje de la red de alimentación. Por ejemplo, si el capacitor recibe un voltaje de 230 V con una frecuencia principal de 60 Hz, el voltaje de alimentación incluye un voltaje supra-armónico adicional de 2 V–20 kHz. La impedancia del capacitor es menor a 20 kHz que a 60 Hz, y la fuente de alimentación conmutada recibe una corriente adicional elevada. Los dispositivos conectados a las redes incluyen principalmente capacitores integrados, como fuentes de alimentación conmutadas, y estos capacitores tienen una impedancia baja para el voltaje de alta frecuencia. El impacto de la alta frecuencia en los componentes de los dispositivos se define como:

$$X_L = \omega \cdot L \quad (6)$$

donde  $X_L$  es la reactancia inductiva,  $\omega = 2\pi f$  es la frecuencia angular,  $f$  es la frecuencia del sistema y  $L$  es la inductancia.

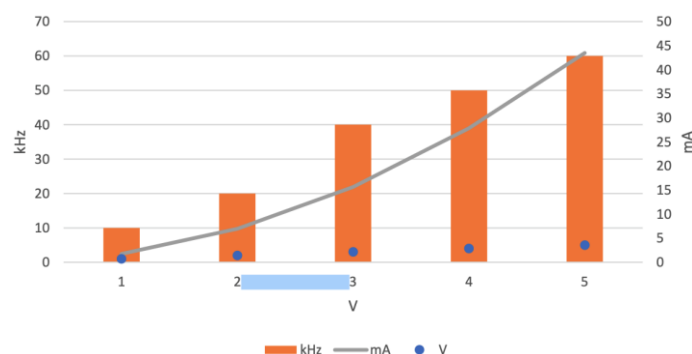
$$X_C = \frac{1}{(\omega \cdot C)} \quad (7)$$

donde  $X_C$  es la reactancia capacitiva, y  $C$  es la capacitancia.

Ecs. (6) y (7) indican que las inductancias para altas frecuencias tienen una reactancia alta, mientras que los capacitores tienen una reactancia muy baja. Lo mismo se aplica a la impedancia como resistencia compleja. Estas ecs. se aplican a todos los dispositivos instalados en la red para determinar la expansión del nivel de perturbación de las perturbaciones de alta frecuencia (supra-armónicas). Por lo tanto, (6) y (7) pueden utilizarse para determinar la cantidad de corriente adicional que fluye a los componentes del dispositivo. Suponiendo un capacitor diseñado para una corriente de 2 mA con un voltaje y frecuencia de red normales, la impedancia del capacitor será 400 veces menor a 20 kHz que a la frecuencia nominal de 60 Hz. Esto significa que fluirá corriente adicional a través del capacitor del dispositivo si la distorsión supra-armónica es, por ejemplo, de 2 V a 20 kHz, la interferencia a la corriente es,

$$I = \frac{2 \text{ V}}{230 \text{ V}} \times 2 \text{ mA} \times 400 = 6.96 \text{ mA} \quad (6.96 \times 10^{-3})$$

Esta misma interferencia de corriente se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Interferencia de perturbación supra-armónica a corriente adicional

### 2.4. Estándares de las Emisiones Supra-armónicas

En el ámbito supra-armónico, las normas se aplican casi exclusivamente a mediciones de emisiones en condiciones de laboratorio. Asimismo, para armónicas inferiores a 2 kHz, también se han tenido en cuenta los límites de calidad de la energía en las redes. La norma IEC 61000-2-2 aborda el rango de frecuencia de 2 a 150 kHz. Se refiere a los niveles de compatibilidad para perturbaciones conducidas de baja frecuencia y señalización en redes

públicas de baja tensión. Los niveles de compatibilidad de distorsión de voltaje especificados en esta norma sirven como niveles de referencia para la coordinación de la Compatibilidad Electromagnética (CEM) a la hora de establecer límites para emisiones no intencionales en modo diferencial. Esta norma se refiere a las restricciones de voltaje en el rango de 2 a 150 kHz que tienen efectos a largo plazo de 10 minutos o más. Los límites de emisión se determinan midiendo los niveles de distorsión de voltaje entre una fase/cero y tierra, así como los voltajes asimétricos. De acuerdo con la norma IEC 61000-2-2, los criterios de niveles de compatibilidad para la distorsión de voltaje en el rango supra-armónico en redes públicas de baja tensión se presentan en la [Tabla 1](#).

**Tabla 1.** Niveles de compatibilidad para la distorsión de voltaje en modo diferencial por encima de la armónica 40 hasta 9 kHz y en modo diferencial de 9 kHz a 150 kHz.

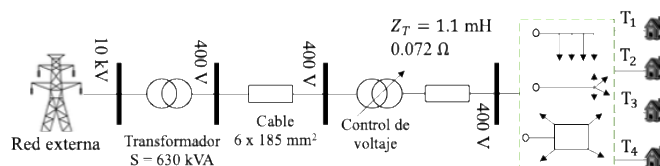
| Rango de frecuencia (kHz) | Niveles de compatibilidad (%) | Rango de frecuencia (kHz) | Niveles de compatibilidad dB ( $\mu V$ ) |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------------------|
| 2 – 3                     | 1.4                           | 9 – 30                    | 129.5 – 122                              |
| 3 – 9                     | 1.4 – 0.65                    | 30 – 50                   | 122 – 119                                |
| --                        | --                            | 50 – 150                  | 113 – 89                                 |

### 3. MÉTODOS

Esta sección describe la metodología empleada en este trabajo, cuyo objetivo es explorar los impactos de las emisiones supra-armónicas de los inversores FV en una red de distribución eléctrica. La investigación se guió por escenarios minuciosamente detallados que permitieron explorar diversas situaciones relevantes para el tema. La pregunta principal que guió esta investigación fue: “¿Es posible cuantificar y comprender las características de las emisiones supra-armónicas de los SFVs?”.

#### 3.1. Laboratorio de redes inteligentes del Instituto de Energías Renovables de la UNAM

En Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM) se estableció el laboratorio de redes eléctricas inteligentes. Dada la importancia crucial de la red de distribución para la integración de FERs, se replicó meticulosamente una red de distribución. Este laboratorio está conectado a la red pública mediante un transformador de 630 kVA y cuenta con un transformador adicional para el control de voltaje. La impedancia típica de una red de distribución se replica mediante inductancias y resistencias. Se pueden implementar diferentes topologías de red, como conexiones en anillo o radiales. En el modelo propuesto con enfoque en simulación se pueden conectar hasta cuatro sucursales con hogares prosumidores, equipados con SFVs, sistemas de almacenamiento de energía (SAE) y carga de vehículos eléctricos. [Figura 4](#) ilustra el diagrama unifilar del laboratorio.



**Figura 4.** Laboratorio de redes inteligentes del IER-UNAM con una red de distribución recreada.

Las casas presentes en la red eléctrica del laboratorio IER-UNAM son prosumidoras, es decir, actúan simultáneamente como consumidoras y productoras de energía. En el modelo propuesto, cada casa está conectada a un contador inteligente, un SFV, un simulador de cadenas FVs, cargas controlables y un SAE basado en baterías. Todas las casas están conectadas a la red eléctrica del Instituto. Además, la casa T1 tiene la particularidad de estar conectada a una estación de carga para vehículos eléctricos, lo que permite integrar este tipo de consumo energético en la red. La [Tabla 2](#) muestra algunas de las principales características de los inversores analizados. El laboratorio de IER-UNAM ha podido simular diversos escenarios controlados, con especial atención a situaciones cotidianas. Algunos ejemplos incluyen la interacción de las emisiones de un inversor FV con las de un vehículo eléctrico.

**Tabla 2.** Características técnicas de los inversores analizados.

| Equipo                       | Rango voltaje MPP | Máx. Potencia salida | Máx. Corriente salida | Conexión a red |
|------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|----------------|
| Fronius IG Plus (Casa T3)    | 230–500 V         | 2,600 VA             | 11.3 A                | 1–NPE 230 V    |
| Fronius Symo GEN24 (Casa T4) | 278–800 V         | 10,000 VA            | 16.4 A                | 3–NPE 230 V    |
| ENPHASE IQ7+ (Microinverter) | 27–45 V           | 290 VA               | 1.26 A                | 1–NPE 230 V    |

También fue posible conectar diferentes tipos de cargas y analizar cómo afectan a la red eléctrica, ya sea a través de emisiones supra-armónicas o modificando la impedancia de la red a frecuencias más altas.

#### 3.2. Equipo de medición

El equipo de medición utilizado es el analizador de calidad de energía FLUKE 148II-A para la captura de datos brutos, el cual tiene una resolución de 16 bits y frecuencia de muestreo de 1 MS/s por canal, con una precisión básica del 0.02 % para cada uno de sus 8 canales. Para la medición de corriente, se empleó una bobina Rogowski, que ofrece un ancho de banda de 1 MHz y una precisión del 1 %. Para la medición de voltaje se utilizó el módulo HSI-LV, conectado mediante conectores banana, que proporciona un ancho de banda de hasta 2 MHz.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

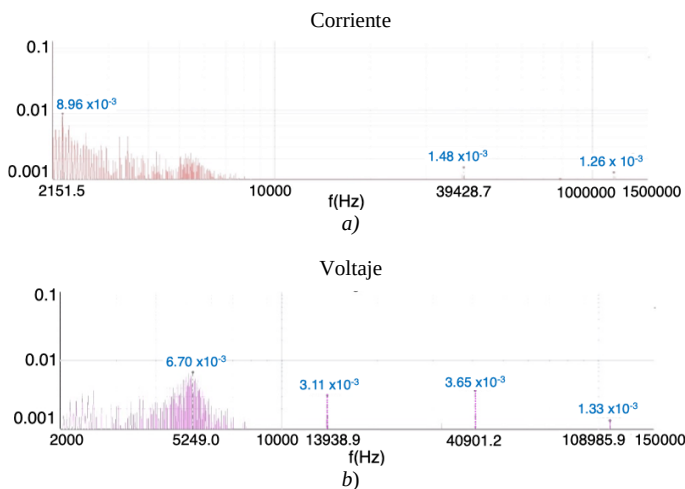
Esta sección presenta los resultados de laboratorio relacionados con las emisiones supra-armónicas de inversores FV en una red de distribución eléctrica. Se describieron diferentes escenarios de estudio utilizando un microinversor y un inversor, con mediciones realizadas en el laboratorio del IER-UNAM, que simularon una red física de distribución eléctrica.

### 4.1. Evaluación de Emisiones Supra-armónicas desde el inversor en Casa T3

En esta sección se analizará el inversor FV monofásico Fronius IG Plus. Este dispositivo proporciona una protección eficaz tanto para el operador como para el equipo gracias a su aislamiento galvánico, equipado con un transformador de alta frecuencia. Todas las mediciones se realizaron considerando una topología de red radial.

#### A) Caso 1

Figura 5 muestra el espectro de frecuencias de 2 a 150 kHz. Inicialmente, se midió la emisión supra-armónica inherente a la red eléctrica, estando el inversor desactivado. Se observó que no había emisiones con una amplitud significativa. Es importante destacar la presencia de emisiones supra-armónicas provenientes del equipo de medición.

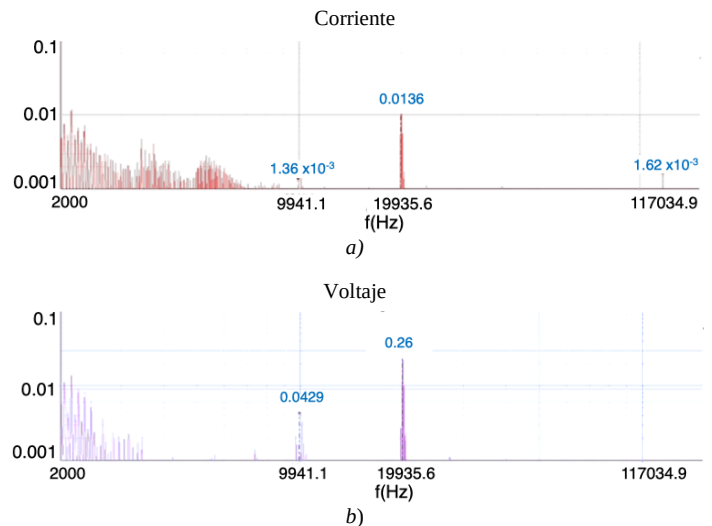


**Figura 5.** Análisis de las emisiones presentes en la red: a) emisiones de corriente; b) emisiones de voltaje.

#### B) Caso 2

El objetivo de este caso de estudio es comprender cómo los diferentes niveles de potencia de salida ( $P_{sal}$ ) del inversor afectan sus emisiones supra-armónicas. Inicialmente, mediante un análisis exhaustivo de la curva del SFV y el punto MPPT, se determinó que la salida del inversor presentaría una corriente de 7 A. Cabe destacar que, en términos del espectro de emisión de corriente y voltaje, se observó una emisión de banda estrecha constante a una frecuencia de 20 kHz, como se muestra en la Figura

6, lo que sirvió como un buen indicador de la frecuencia de conmutación del inversor y sus emisiones correspondientes. También es importante destacar que, en todo el rango de frecuencia de 2 a 9 kHz, se observaron emisiones supra-armónicas constantes. Según la literatura, las emisiones armónicas persisten hasta los 9 kHz. En el espectro de corriente, también se observó una emisión de banda estrecha a 117 kHz, probablemente atribuible a las emisiones presentes en la red eléctrica. Tanto el espectro de corriente como el de voltaje indican la presencia de una emisión de banda estrecha alrededor de los 10 kHz. Cabe destacar que las emisiones de corriente son más perjudiciales que las de voltaje.



**Figura 6.** Análisis de emisiones supra-armónicas para una  $P_{sal} = 7A$ : a) emisiones de corriente; b) emisiones de voltaje.

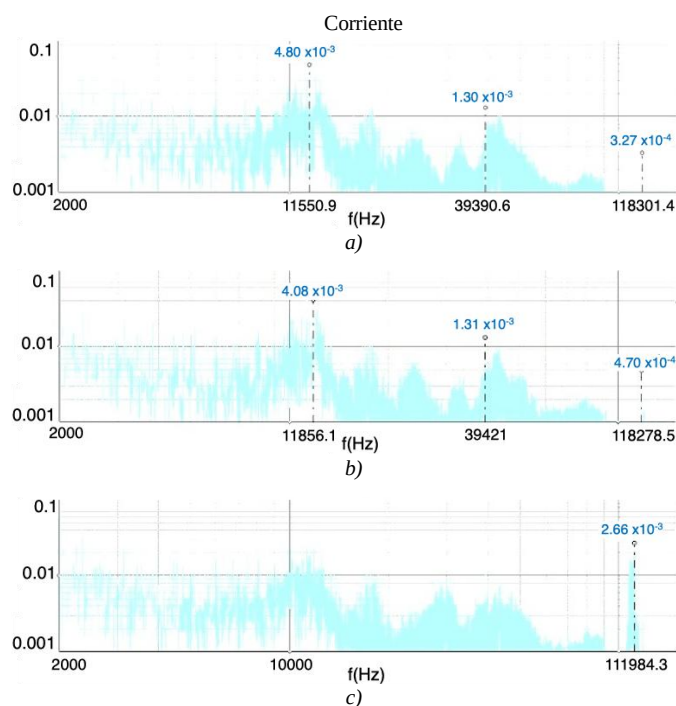
### 4.2. Evaluación de las Emisiones Supra-armónicas del Micro-inversor

El micro-inversor monofásico ENPHASE IQ7+ tiene una potencia nominal de 290 VA y utiliza comunicación PLC para conectarse al optimizador, lo que maximiza la producción de energía y mejora la eficiencia del sistema. Las mediciones se realizaron con una luminaria diseñada para simular la radiación solar.

En la Figura 7 se presenta la primera medición, realizada en condiciones de baja radiación.

Tras el análisis, se observa una posible frecuencia de conmutación de 20 kHz. También, se muestra el espectro de frecuencia de las emisiones en condiciones de radiación media y máxima, respectivamente. Un análisis inicial de los espectros de frecuencia revela que la amplitud de las emisiones no varió en función de los niveles de radiación.

En resumen, se observó que, en todos los análisis, predominaron las emisiones de fondo, las emisiones secundarias y las emisiones primarias del propio micro-inversor. Por lo tanto, se concluye que la red en estudio se vio significativamente afectada por las emisiones supra-armónicas.



**Figura 7.** Análisis de las emisiones supra-armónicas de corriente: a) radiación solar; b) radiación solar media; c) radiación solar máxima.

### 4.3. Discusión de resultados

Es bien sabido que la corriente de un inversor suele presentar un desfase cercano a los  $90^\circ$  con respecto al voltaje debido a la presencia de un capacitor en el filtro de conexión entre el inversor y la red eléctrica. La mayoría de los dispositivos electrónicos contienen capacitores diseñados específicamente para eliminar el ruido de alta frecuencia de las señales de entrada. Sin embargo, es importante destacar que los capacitores absorben los componentes de alta frecuencia, ya que su impedancia es inversamente proporcional a la frecuencia. Esta característica puede provocar un calentamiento significativo, reduciendo la vida útil de estos componentes y acelerando la degradación del propio equipo. La integración entre la red y filtros influye en la cantidad de corriente absorbida por otros dispositivos, alterando las frecuencias de resonancia.

Cuando el inversor se conecta en un entorno con emisiones de alta frecuencia, el capacitor proporciona una ruta de baja impedancia, lo que permite que los componentes de alta frecuencia se propaguen al inversor mientras está en funcionamiento. Cabe destacar que, incluso cuando el inversor no está en funcionamiento, puede generar emisiones de alta frecuencia. La corriente medida en el terminal de un inversor conectado a la red eléctrica constará de emisiones primarias y secundarias, lo que puede provocar el fenómeno conocido como intermodulación. De esta manera, un inversor FV influye en las emisiones de alta frecuencia tanto en la red como en la instalación mediante la inyección y la absorción de estas emisiones. La [Tabla 3](#) ofrece un resumen de las emisiones de alta frecuencia registradas en los dos inversores FVs examinados, que presentaron componentes en el umbral del rango audible para

los humanos. El ruido audible resultante de la interferencia de las emisiones de alta frecuencia puede tener un impacto significativo en diversos aspectos de la vida cotidiana. El objetivo de estos escenarios fue describir el comportamiento de las emisiones de alta frecuencia, identificando tanto las emisiones primarias como las secundarias, así como las intencionales y no intencionales. En uno de los escenarios, el enfoque se centró en la interferencia de las emisiones de alta frecuencia de la casa T4 con las de la casa T3, con el fin de observar y comprender la inter-modulación de las emisiones de alta frecuencia. Se observó un aumento en la amplitud de las emisiones primarias con la conexión de otras cargas.

**Tabla 3.** Emisiones supra-armónicas de corriente desde el equipo analizado

| Equipo       | Frecuencia de conmutación (kHz) | Amplitud (mA) |
|--------------|---------------------------------|---------------|
| Casa T3      | 20                              | 14.1          |
| ENPHASE IQ7+ | 20                              | 4.08          |

En otro escenario, se analizó el micro-inversor ENPHASE IQ7+, donde se observó que las emisiones de alta frecuencia se mantuvieron constantes independientemente de las variaciones en la radiación solar. Es importante destacar que estos resultados subrayan la relevancia de la topología de los equipos electrónicos, tanto en la emisión como en la mitigación de las emisiones de alta frecuencia. Dependiendo de su topología, estos dispositivos pueden actuar como elementos de protección para la red eléctrica al absorber dichas emisiones. Actualmente, esta absorción se produce de forma perjudicial para los propios dispositivos debido a su impedancia interna. En el futuro, se espera que estos dispositivos puedan absorber las emisiones de forma segura, beneficiando tanto al equipo como a la red eléctrica a la que están conectados.

### 5. CONCLUSIONES

Este artículo aborda el problema de las emisiones de alta frecuencia, clasificadas como supra-armónicas. El objetivo de este estudio fue analizar el comportamiento de las emisiones supra-armónicas de inversores FVs y la propagación de corrientes supra-armónicas. Se utilizaron tres modelos de inversores FVs para comprender y analizar la propagación de corrientes armónicas primarias a dispositivos secundarios y para observar la influencia de las emisiones de fondo y otras emisiones externas en las emisiones secundarias de los dispositivos. Los modelos son simplificados y omiten parte de las interacciones que pueden ocurrir entre dispositivos. A continuación se enlistan los hallazgos más importantes de la investigación.

- Se midieron las emisiones supra-armónicas de inversores FVs individuales para obtener espectros de emisiones primarias. Si bien las mediciones a frecuencias superiores a 20 kHz presentaron una menor precisión, se obtuvieron valiosos conocimientos. Además, se analizó el efecto de las emisiones externas en el espectro para estudiar la absorción y los flujos de corrientes supra-armónicas.

- La distorsión por inter-modulación produce componentes supra-armónicos adicionales en frecuencias relacionadas con las frecuencias fundamentales de conmutación (que difieren en algunos kHz). Por lo que, es evidente que la intermodulación es independiente de la producción de energía de los inversores FVs. Una vez desconectados los equipos responsables de las emisiones secundarias, la distorsión por inter-modulación deja de ser perceptible. Por lo que, se concluye que la inter-modulación entre dispositivos no se produce de forma sistemática, y el mecanismo subyacente de estas interacciones requiere mayor investigación.
- Las emisiones supra-armónicas de los inversores FVs conectados a la red eléctrica pueden comprometer la estabilidad de la infraestructura eléctrica. Por lo tanto, comprender con precisión la impedancia inherente de la red eléctrica es fundamental. Para esto, es necesario realizar un análisis exhaustivo de su predicción y su impacto en la calidad de la energía, considerando los posibles efectos de las perturbaciones inducidas por los inversores FVs conectados a la red, ya sea mediante la creación de rutas de baja impedancia o la atenuación de las emisiones en casos de resonancias paralelas.
- Las emisiones en el rango supra-armónico fluyen predominantemente entre dispositivos cercanos, aunque algunas emisiones también se propagan a través de la red eléctrica. El propósito de investigar el comportamiento de la red eléctrica a frecuencias más altas es comprender cómo la conexión de equipos que utilizan electrónica de potencia influye en la impedancia. Estos hallazgos son esenciales para esclarecer la propagación de las emisiones supra-armónicas en el rango de 2 a 150 kHz.

## REFERENCIAS

- [1] Slangen, T.; Wijk, T.; Cuk, V.; and Cobben, S. "The propagation and interaction of supraharmonics from electric vehicle chargers in a low-voltage grid," *Energies*, 2020, 13, 3865.
- [2] Alkahtani, A.; Alfalahi, S.; Athamneh, A.; Al-Shetwi, A.; Mansor, M.; and Hannan, M. "Power quality in microgrids including supraharmonics: Issues, standards, and mitigations," *IEEE Access*, 2020, 8, 127104.
- [3] *Std 519-2014*; IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems; (Revision of IEEE Std 519-1992). IEEE: New York, NY, USA, 2014; pp. 1–29.
- [4] *Std 1547-2003*; IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. IEEE: New York, NY, USA, 2003; pp. 1–28.
- [5] Grasel, B.; Baptista, J.; Tragner, M. The impact of V2G charging stations (active power electronics) to the higher frequency grid impedance. *Sustain. Energy Grids Netw.* 2024, 38, 101306.
- [6] He, L.; Xu, S.; Li, H.; Zhu, K.; Ji, Z. Analysis of the Supraharmonic Characteristics of VSR PWM Converter. In *Proceedings of the 2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)*, Hefei, China, 12–14 May 2023; pp. 842–847.
- [7] Abid, F.; Busatto, T.; Rönnberg, S.K.; Bollen, M.H.J. Intermodulation due to interaction of photovoltaic inverter and electric vehicle at supraharmonic range. In *Proceedings of the 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Belo Horizonte, Brazil, 16–19 October 2016; pp. 685–690.
- [8] Khokhlov, V.; Meyer, J.; Schegner, P. Thermal Interactions in Modern Lighting Equipment due to Disturbances in the Frequency Range 2–150 kHz. In *Proceedings of the 2019 IEEE Milan PowerTech*, Milan, Italy, 23–27 June 2019; pp. 1–6.
- [9] Baptista, J.; Morais, R.; Valente, A.; Soares, S.; Candeias, M.; Reis, M. HarmoSIm: A tool for harmonic distortion simulation and assessment of nonlinear loads. *Comput. Appl. Eng. Educ.* 2014, 22, 340–348.
- [10] Grasel, B.; Baptista, J.; Tragner, M.; Leonhartsberger, K.; Keusch, G. Supraharmonic Emissions of a bidirectional electric vehicle charging station—A research methodology based on tests at reconstructed distribution grid. In *Proceedings of the 2021 IEEE 4th International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)*, Busan, Republic of Korea, 9–11 October 2021; pp. 51–59.
- [11] Slangen, T.; van Wijk, T.; Cuk, V.; Cobben, S. The Propagation and Interaction of Supraharmonics from Electric Vehicle Chargers in a Low-Voltage Grid. *Energies* 2020, 13, 3865.
- [12] Mariscotti, A.; Mingotti, A. The Effects of Supraharmonic Distortion in MV and LV AC Grids. *Sensors* 2024, 24, 2465.
- [13] Prudenzi, A.; Fioravanti, A.; Silvestri, A.; Ciancetta, F.; Fiorucci, E.; Mari, S. Overview of the Propagation of Supraharmonics in Power Systems. In *Proceedings of the 2022 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Rome, Italy, 3–5 October 2022; pp. 1–6.
- [14] Alfalahi, S.T.Y.; Alkahtani, A.A.; Al-Shetwi, A.Q.; Al-Ogaili, A.S.; Abbood, A.A.; Mansor, M.B.; Fazea, Y. Supraharmonics in Power Grid: Identification, Standards, and Measurement Techniques. *IEEE Access* 2021, 9, 103677–103690.
- [15] Espín-Delgado, Á.; Rönnberg, S.; Sudha Letha, S.; Bollen, M. Diagnosis of supraharmonics-related problems based on the effects on electrical equipment. *Electr. Power Syst. Res.* 2021, 195, 107179