



Artículo de investigación



Análisis del comportamiento de la distorsión armónica de corriente en inversores interconectados a la red eléctrica, mediante el uso de metodología de diseño experimental

Analysis of the behavior of current harmonic distortion in inverters interconnected to the electrical grid, through the use of experimental design methodology

Adán Alberto Jumilla Corral¹ , Zulma Yadira Medrano Hurtado² , Pedro Mayorga Ortiz¹ , Hernán Daniel Magaña Almaguer³ , Mario Alberto Camarillo Ramos⁴ 

¹Departamento de Eléctrica - Electrónica, Instituto Tecnológico de Mexicali, Av., Tecnológico S/N, CP 21376 colonia Elías Calles, Mexicali Baja California, México

²Departamento de Ciencias Básicas, Instituto Tecnológico de Mexicali, Av., Tecnológico S/N, CP 21376 colonia Elías Calles, Mexicali Baja California, México

³Departamento de Metal - Mecánica, Instituto Tecnológico de Mexicali, Av., Tecnológico S/N, CP 21376 colonia Elías Calles, Mexicali Baja California, México

⁴Departamento de Computación y Sistemas, Instituto Tecnológico de Mexicali, Av., Tecnológico S/N, CP 21376 colonia Elías Calles, Mexicali Baja California, México

Autor de correspondencia: Mario Alberto Camarillo Ramos, Departamento de Computación y Sistemas, Instituto Tecnológico de Mexicali, Av., Tecnológico S/N, CP 21376 colonia Elías Calles, Mexicali Baja, California, México. E-mail: mario.camarillo@itmexicali.edu.mx. ORCID: 0000-0003-0700-1885.

Recibido: 18 de Noviembre del 2022

Aceptado: 20 de Enero del 2023

Publicado: 25 de Enero del 2023

Resumen. - En este trabajo de investigación se realizó un estudio del comportamiento de la distorsión armónica de corriente en un nodo de carga alimentado por la red pública de energía eléctrica y por inversores interconectados al mismo nodo. El análisis se desarrolló a través de un diseño experimental, empleando herramientas estadísticas como el análisis de la varianza y arreglos factoriales completos, aplicados a datos experimentales obtenidos mediante la configuración de un banco de pruebas con un punto de acoplamiento común con la carga, donde se integran las potencias de la red y de los sistemas renovables (fotovoltaicos), a través de inversores electrónicos. Los resultados obtenidos muestran que el impacto en la distorsión armónica de corriente en el nodo de carga depende mayormente del tipo de inversor utilizado y de la carga conectada al nodo. Además, los flujos de armónicas aparecen en mayor medida en la red del suministrador en comparación con las armónicas presentes en las cargas conectadas al nodo bajo estudio.

Palabras clave: Calidad de la energía eléctrica; Distorsión armónica de corriente; Análisis de la varianza; Arreglos factoriales.

Abstract. - In this research work, a study of the behavior of current harmonic distortion was carried out in a load node fed by the public electricity network and by inverters interconnected to the same node. The analysis was developed through an experimental design, using statistical tools such as analysis of variance and complete factorial arrangements, applied to experimental data obtained by configuring a test bench with a common coupling point with the load, where They integrate the powers of the network and renewable systems (photovoltaic), through electronic inverters. The results obtained show that the impact on current harmonic distortion in the load node depends mainly on the type of inverter used and the load connected to the node. In addition, the harmonic flows appear to a greater extent in the supplier's network compared to the harmonics present in the loads connected to the node under study.

Keywords: Power quality; Current harmonic distortion; Analysis of variance; Factorial arrangements.



1. Introducción

El inversor es el elemento principal de la interfaz de generación fotovoltaica (FV) y eólica con la red eléctrica convencional [1-5]. La función elemental del inversor es tomar la señal de cd (corriente directa) de entrada con un V_i (voltaje de entrada) y convertirla a una señal de ca (corriente alterna) de salida con un V_o (voltaje de salida) y f_o (frecuencia de salida) [5, 6]. La señal de salida del inversor se debe adaptar a las condiciones de la red en el punto de interconexión, sin causar perturbaciones ni cambios en las especificaciones de suministro en la red o en los demás usuarios [6-9].

Un inversor ideal produciría una señal senoidal pura en su salida, sin embargo, los inversores reales producen corrientes armónicas en los sistemas de potencia [3, 10-15]. Las corrientes armónicas son señales sinusoidales que a diferencia de las corrientes fundamentales (corrientes con frecuencias de 50 o 60 Hz), tienen frecuencias que son múltiplos enteros “ n ” de la frecuencia fundamental de trabajo del sistema y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo a razón de “ $1/n$ ”; donde, el número “ n ” determina el rango de la componente armónica. Se denomina “armónico de rango u orden armónico n ” a la componente armónica del rango correspondiente a “ n ” veces la frecuencia de la red.

Los armónicos son producidos por cargas no lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante. Estas cargas no lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión sinusoidal, absorben una corriente no sinusoidal.

Las cargas no lineales más comunes son las que se encuentran en los receptores alimentados por electrónica de potencia tales como variadores de velocidad, convertidores (rectificadores e inversores), entre otros.

La forma de onda final de corriente (distorsionada) en sistemas eléctricos con presencia de armónicos estará compuesta por un número de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, incluyendo una referida a la frecuencia fundamental (60 o 50 ciclos), que al pasar por la impedancia del sistema generará una caída de tensión también distorsionada.

En una red de potencia eléctrica, los aparatos y equipos que se conectan a él, tanto por la propia compañía suministradora como por los clientes, están diseñados para operar a 50 o 60 ciclos, con una tensión y corriente sinusoidal.

La presencia de parámetros de corriente y/o voltaje distorsionados pueden ocasionar efectos negativos en las cargas, como el mal funcionamiento, disminución de la vida útil o daños en las mismas [5, 13, 16, 17].

En otro contexto, y como consecuencia de la apertura de los mercados eléctricos a nivel mundial y el aumento en la integración de las fuentes de energía renovable no convencional (eólica y/o FV en las redes eléctricas, la generación, transmisión y distribución de esta energía es llevada a cabo por diferentes participantes que integran este mercado [18, 19].

Los organismos encargados de mantener las condiciones adecuadas de operación de los sistemas eléctricos, emiten normativas (códigos de red) que establecen los requerimientos mínimos de operación para dichos sistemas en cada país [11, 18, 20, 21].

Entre los requerimientos técnicos contenidos en estos documentos se encuentran los referentes a la calidad de la energía eléctrica; haciendo énfasis en los contenidos de distorsión armónica de corriente y voltaje con los que deben cumplir tanto los suministradores como los usuarios [16], por lo que es de gran importancia el estudio del comportamiento de



estos parámetros para el adecuado funcionamiento de la red [22].

Este estudio tiene como finalidad determinar las condiciones y parámetros más desfavorables, en los cuales factores como el tipo de inversor, la potencia de generación, así como el tipo de carga alimentada, influyen en la aparición de corrientes armónicas en el sistema del organismo suministrador, cuando se conjuntan en un mismo nodo, la potencia de la red y la de los sistemas de generación FV. El análisis se llevará a cabo mediante el uso de herramientas estadísticas (diseño de experimentos -DDE-) que permitan identificar y cuantificar el efecto e influencia de los factores antes mencionados.

2. Trabajos Relacionados

Utilizando diferentes enfoques, diversas investigaciones se han llevado a cabo para estudiar los efectos que causa la integración de potencia (FV) en las redes convencionales, en lo referente a la distorsión armónica de corriente [23].

En [24], se informó de los problemas de Calidad de la Energía Eléctrica (CEE), específicamente de armónicas e interarmónicas en tres plantas FV reales conectadas a la red. En una primera planta FV de menos de 500 kW se encontró distorsión de la forma de onda de la corriente, una segunda granja solar de 28 kV a 600 V presentó salidas del sistema debido a distorsión armónica, y el último ejemplo involucró oscilaciones subsíncronas en tres granjas solares de 10 MVA cada una, conectadas a la red. Al término de la investigación y mediante el análisis de las mediciones realizadas tomadas en campo, se concluyó que las causas de las inestabilidades presentadas implicaban interacciones entre los sistemas de control del inversor FV y las impedancias características de la red.

El comportamiento de CEE, específicamente en lo referente a la distorsión armónica de 17 plantas de energía solar FV, fue analizado en [25], esto con el

propósito de estudiar los efectos de la CEE de los inversores solares FV.

El análisis de las mediciones arrojó que la generación de los sistemas FV con carga local, reducía o mantenía la Distorsión Armónica Total de voltaje (THDv). Mientras en los sistemas FV más grandes, cuya generación era integrada a las redes de subtransmisión, tendieron a tener un impacto negativo, al aumentar la distorsión; esto se debió a que no existían cargas de clientes en los servicios públicos locales que pudieran consumir estos armónicos de corriente generados, evidenciando la influencia de diversos factores, como el tipo de carga (local o no local) y el tamaño de la planta, en la introducción de armónicos en las redes. Las conclusiones derivadas de dicho estudio mostraron la necesidad de mantener o reducir la distorsión armónica, en los sistemas de transmisión y subtransmisión con generación FV integrada.

En [26], se analizaron las corrientes armónicas de bajo orden generadas por un sistema FV. Las mediciones de campo se tomaron bajo diferentes niveles de irradiación solar, así como bajo diversos valores de factor de potencia del inversor. Al analizar la integración de potencia del sistema FV en la red de suministro, se encontró que la Distorsión Armónica Total de corriente (THDi), fue inversamente proporcional a la potencia generada.

Las investigaciones de [27], analizaron la interacción entre tres inversores solares diferentes, acoplados a un pequeño sistema FV conectado a la red, estudiándose la THDv y la THDi, evaluando la CEE entregada por cada uno de estos equipos a la red de distribución local. En las mediciones que se realizaron en un lapso de tres semanas en plantas FV, se encontró que los pequeños inversores solares analizados producían niveles considerables de THDi cuando se sometían a niveles de potencia por debajo de su valor nominal.



También en [28], se analizó el impacto de otro sistema FV conectado a la red, evaluando los indicadores de CEE en función de los niveles especificados en las normas que regulan al Sistema Eléctrico Nacional local. Los resultados obtenidos mediante el uso de un dispositivo analizador de redes eléctricas en la salida del inversor del sistema conectado a la red, mostraron que el comportamiento de la distorsión armónica de corriente aumentaba en los períodos del día con poca potencia activa, determinándose que el rendimiento del inversor en relación con los criterios de CEE era satisfactorio a plena carga.

En el artículo [29], se revisó la presencia de distorsión armónica en redes de baja potencia, basadas en generación FV en diferentes escenarios y los diversos factores que influyen en la distorsión armónica en la red. El estudio general mostró que la THD_v fue mínima para toda la relación de potencia FV, bajo diferentes condiciones solares, sin embargo, los límites para THD_i fueron sobrepasados para una generación mínima de potencia del sistema FV. Se concluyó que el nivel de THD en la red del sistema de energía variaba en diferentes contextos, como lo son el porcentaje de penetración FV en la red de distribución con respecto a los tipos de cargas conectadas, la ubicación de la integración FV, el efecto de resonancia armónica en la red eléctrica y la potencia de salida de inversores FV con irradiación solar variable.

Es importante recalcar que todas las investigaciones analizadas contemplan la interacción entre diversos elementos que integran o intervienen en los sistemas de generación FV, ya sean aislados o integrados a las redes eléctricas de transmisión y distribución y su efecto en la generación e introducción de armónicas tanto de corriente como de voltaje. Los sistemas de control e impedancias de red, consumo local de la energía FV generada o integración de dicha energía a la red de suministro, valores de irradiación solar, factores de potencia y tipos de inversores utilizados, así como los niveles de potencia generados, el

porcentaje de integración de la energía FV a la red y el tipo de carga alimentada son mencionados como los factores responsables de los problemas de CEE, principalmente los relacionados con la distorsión armónica tanto de corriente y de voltaje. También es necesario destacar que ninguno de los anteriores trabajos contempló el uso de las técnicas de DDE para determinar cuáles de estos factores influyen en menor o mayor grado en la THD_i de la red de suministro.

3. ¿Cómo trabaja el diseño de experimentos?

El DDE hace uso de técnicas y herramientas estadísticas, con la finalidad de analizar o mejorar el desempeño de un conjunto de variables o de una variable en particular. Tiene como propósito principal establecer conclusiones válidas y robustas acerca del proceso o sistema analizado [30, 31].

Usando las teorías del diseño experimental tales como el análisis de la varianza (ANDEVA - ANOVA, por sus siglas en inglés-) y diseños factoriales completos [32-34], se estudiaron las tendencias de los flujos de armónicos de corriente en el punto de interconexión de un sistema eléctrico bajo condiciones controladas, en donde convergen generación eléctrica renovable no convencional (FV -mediante inversores electrónicos de potencia-) y la red pública de suministro eléctrico (RED); alimentando diversos tipos de cargas como resistivas (R), inductivas (L) y capacitivas (C); con el fin de proporcionar la robustez estadística a los comportamientos de las corrientes armónicas generadas por inversores interconectados a la RED y determinar cuáles factores y combinación de estos son los que más influyen en la THD_i en la red.

La ANDEVA es una herramienta estadística que se utiliza para comparar las varianzas entre las medias (o el promedio) de diferentes grupos (en este caso, la variable de respuesta analizada



es la THDi). El resultado de la ANDEVA es la 'estadística Fisher (F)'. Esta relación muestra la diferencia entre la varianza dentro del grupo y la varianza entre grupos, lo que finalmente produce una cifra que permite concluir que la hipótesis nula (H_0) es respaldada o rechazada. Si hay una diferencia significativa entre los grupos, H_0 (cuando las medias son iguales) no es compatible y la razón F será mayor.

La ANDEVA solo establecerá si existe una diferencia significativa entre las medias de al menos dos grupos, pero no explicará cual es el par que difiere en sus medias. Si existe un requisito de datos detallados, el despliegue de los procesos estadísticos de seguimiento adicionales ayudará a descubrir qué grupos difieren en el valor medio.

Normalmente, ANDEVA se utiliza en combinación con otros métodos estadísticos como lo son el método de las mínimas diferencias significativas (LSD por sus siglas en inglés) y la prueba de Duncan.

Los diseños factoriales completos se utilizan cuando existen dos o más variables independientes. Cada uno de estos factores puede tener varios niveles. El diseño factorial completo solo se puede utilizar en el caso donde se utilizan todas las posibles combinaciones de los factores y sus niveles.

La metodología para determinar el ANDEVA y los arreglos factoriales completos, se halla reportada a detalle en [35, 36].

4. Materiales y métodos

Se diseñó un banco de pruebas para simular un sistema de generación de energía eléctrica donde se pudieran integrar tanto la potencia eléctrica FV como la potencia de la RED en un nodo común, para alimentar diversas cargas; dicho banco fue constituido por dos arreglos fotovoltaicos de 1500 W cada uno, el primero conformado por 6 paneles monocristalinos de 250 W, el segundo cuenta con

6 paneles policristalinos de 250 W. La conversión de cd a ca estuvo a cargo de dos sistemas de inversores, el primero está formado por 6 microinversores marca INVOLAR (inversor #1) de 250 W conectados a cada panel policristalino (6 paneles en total), el arreglo monocristalino se conectó a un inversor central marca ABB (inversor #2) de 3000 W. Ambos arreglos (inversores) entregan en el lado de ca , 220 V, 2 fases (2ϕ), 3 hilos ($3H$). El punto de acoplamiento común (PCC, por sus siglas en inglés) donde convergen la RED y la generación proveniente de los sistemas fotovoltaicos, está compuesto físicamente por un tablero de distribución monofásico, 220 V, 125 A, mediante el cual se alimentaron cargas variables R, L y C (módulos de prueba marca Labvolt); ajustadas para demandar una corriente de 4,2 amperes.

Para la medición de la THDi en los diferentes puntos de prueba, se utilizó un analizador de redes eléctricas 3ϕ de la marca Fluke, modelo 435-serie II, que utiliza indicadores de referencia fijados en la norma EN-50160 con respecto a la calidad de la energía eléctrica [37]. Los pasos para el análisis del comportamiento de la distorsión armónica de corriente en nodo de carga mediante las técnicas de DDE fueron los siguientes:

- Preparación del banco de pruebas: Punto de reunión de los equipos (Módulos fotovoltaicos, inversores, centros de carga, módulos de carga LabVolt (R, L y C).
- Configuración del equipo de medición: Ajuste de los parámetros de monitoreo en base a la topología eléctrica del banco de pruebas y a la normativa de funcionamiento del equipo de medición.
- Determinación del diseño del experimento: Mediciones preliminares del THDi, para aplicar el ANDEVA y el modelo factorial.
- Recolección de datos: Desarrollo de pruebas diseñadas en el experimento, obtención



de datos para el ANDEVA y el modelo factorial.

- ANDEVA: Con los datos obtenidos de las mediciones, se efectuó el ANDEVA para cada uno de los casos previstos.
- Análisis del modelo factorial: Con los datos obtenidos de las mediciones, se realizó el análisis del modelo factorial para cada uno de los casos previstos.
- Análisis de resultados: Mediante los criterios que dictan las metodologías experimentales utilizadas (ANDEVA, modelos factoriales y *LSD*), se analizaron los resultados.

En la Figura 1 se muestra el diagrama esquemático general para la conformación del banco de pruebas.

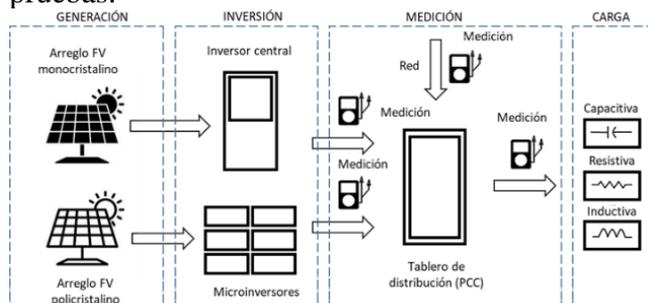


Figura 1. Diagrama esquemático general del banco de pruebas.

En la figura 2 podemos observar el arreglo físico utilizado para la recolección de datos.



Figura 2. Elementos del banco de pruebas: a) Módulos fotovoltaicos, b) Microinversores, c) Inversor central, d) Tablero de distribución.

Se conjuntó la generación de ambos arreglos fotovoltaicos y sus respectivos inversores, conectándolos al PCC. El centro de carga fue alimentado tanto por los inversores como por la RED (220/127 V, 1 ϕ , 3H); de tal modo que las tres fuentes alimentarían las cargas (R, L y C) en forma conjunta o separadamente. Las diferentes cargas se ajustaron para demandar 4,2 A del nodo de alimentación a un voltaje de 127 V. El analizador de redes fue configurado para medir sistemas 1 ϕ a 2H, alimentación de 127 V, con transformadores de corriente tipo pinzas ajustadas a 40 A; seleccionando en el equipo de prueba la opción “armónicos”, que permite monitorear la distorsión armónica total de corriente y voltaje bajo los criterios de la norma EN-50160 [37].

Mediante mediciones preliminares del THDi en diversos puntos (alimentadores) en el banco de pruebas, se determinaron los tratamientos adecuados (factores), para los diversos análisis comparativos (ANDEVA) del THDi, así como los factores y sus correspondientes niveles para el arreglo factorial a utilizar.

Los experimentos factoriales contaron con tres factores (tipo de inversor, tipo de carga y generación), el tipo de inversor a dos niveles (inversor #1 e inversor #2), el tipo de carga a tres niveles (R, L, C) y generación a tres niveles (0, 1,0 y 4,5 amperes de generación); se llevaron a cabo dos replicas por cada condición experimental. Se realizaron en forma aleatoria 228 mediciones, para las diferentes comparaciones de medias utilizando el ANDEVA y la metodología *LSD*. Además, se realizaron 54 mediciones aleatorias para el arreglo factorial.

5. Resultados y discusiones

La Tabla 1 muestra como ejemplo, el análisis para la comparación del THDi en el alimentador de la red de suministro, contra el THDi en el alimentador hacia la carga, sin



inyectar ningún tipo de generación FV de los inversores en el nodo de conexión.

Tabla 1. ANDEVA, a) Tabla de datos, b) Tabla para el ANDEVA.

		Red de suministro vs. Alimentador de carga					
A		R_c	R_l	L_c	L_l	C_c	C_l
		1,38	1,62	1,92	1,89	9,98	9,62
		1,7	1,75	1,99	1,97	9,55	10,23
$T.j = total$		3,14	3,37	3,91	3,86	19,53	19,88
$Y.j = media$		1,57	1,69	1,96	1,933	9,77	9,94
							$T.. = 53,6'$

B		ANOVA				
	SS	g.l.	MS	F_{exp}	$F(0,05,5,6)$	
FACTOR	173,8	5	34,76	543,76	4,39	
ERROR	0,38	6	0,06			
TOTAL	174,19	11				

La suma de cuadrados y grados de libertad para la ANDEVA se determinan de la siguiente forma:

Suma de cuadrados totales...

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{T^2}{N} \quad (1)$$

$$SST = (1,38)^2 + (1,76)^2 + (1,62)^2 + (1,75)^2 + (1,92)^2 + (1,99)^2 + (1,89)^2 + (1,97)^2 + (9,98)^2 + (9,55)^2 + (9,62)^2 + (10,26)^2 - \frac{53,69^2}{12} = 174,19$$

Suma de los cuadrados de los tratamientos...

$$SS_{tr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{T^2}{N} \quad (2)$$

$$SS_{tr} = \frac{(3,14)^2}{2} + \frac{(3,37)^2}{2} + \frac{(3,91)^2}{2} + \frac{(3,86)^2}{2} + \frac{(19,53)^2}{2} + \frac{(19,88)^2}{2} - \frac{(53,69)^2}{12} = 173,80$$

Suma de los cuadrados del error...

$$SS_e = SS_T - SS_{tr} \quad (3)$$

$$SS_e = 174,19 - 173,80$$

$$= 0,38$$

Grados de libertad totales...

$$gl_T = N - 1 \quad (4)$$

$$gl_T = 12 - 1$$

$$gl_T = 11$$

Grados de libertad tratamientos...

$$gl_{tr} = a - 1 \quad (5)$$

$$gl_{tr} = 6 - 1$$

$$gl_{tr} = 5$$

Grados de libertad del error...

$$gl_e = N - a \quad (6)$$

$$gl_e = 12 - 6$$

$$gl_e = 6$$

Media de los cuadrados de los tratamientos...

$$MS_{tr} = \frac{SS_{tr}}{gl_{tr}} \quad (7)$$

$$MS_{tr} = \frac{173,8}{5}$$

$$MS_{tr} = 34,76$$

Media de los cuadrados del error...

$$MS_e = \frac{SS_e}{gl_e} \quad (8)$$

$$MS_e = \frac{0,38}{6}$$

$$MS_e = 0,06$$

Donde “N” es en número de datos, “a” es el número de tratamientos y “n” el número de réplicas.

Para definir el criterio de comparación con la prueba estadística de Fisher, tenemos:



Valor de la distribución de Fisher experimental...

$$F_{exp} = \frac{MS_{tr}}{MS_e} \quad (9)$$

$$F_{exp} = \frac{34,76}{0,06}$$

$$F_{ex0} = 543,76$$

De la tabla de distribución *Fisher* para un nivel de confianza (α) de 0,05,5 como los grados de libertad en “x” y 6 como los grados de libertad en “y” corresponde un valor de “F” crítica de 4,39. Se compara ahora la “F” experimental contra la “F” crítica. Como $543,76 > 4,39$ entonces se rechaza la hipótesis H_0 . No todos los factores son iguales. Este resultado es de esperarse, ya que el ANDEVA compara todos los factores entre sí, y al existir cargas diferentes (R, L, C), los niveles de THDi en las cargas capacitivas presentan valores mayores debido al fenómeno de resonancia.

Cuando se rechaza una hipótesis nula significa que las medias de los tratamientos son significativamente diferentes en al menos un par de ellas. Una manera de efectuar un comparativo entre medias individuales es aplicar el método *LSD*; el criterio es:

$$LSD = t_{\alpha/2; N-a} \sqrt{\frac{2MS_e}{n}} \quad (10)$$

donde *LSD* es la mínima diferencia significativa, α es el nivel de confianza, $N - a$ es el número de grados de libertad del error, y $MS_{(ERROR)}$ es la media de cuadrados del error.

Para nuestro ejemplo:

$$LSD = \left(\frac{(0,05/2), 6}{(0,025), 6} \right) \sqrt{\frac{2(0,06)}{2}}$$

De la tabla de distribución t-Student para 0,025,6 corresponde 2,44

$$LSD = 2,44 \times \sqrt{(0,06)}$$

$$LSD = 0,59$$

Ahora, cada par de medias individuales que difieran en valor absoluto por más de 0,59 implican que son significativamente diferentes. De la Tabla 1, las comparaciones de las medias de cada tratamiento individual son:

$$R_C - R_L = |1,57 - 1,68| = 0,11$$

$$R_C - L_C = |1,57 - 1,95| = 0,38$$

$$R_C - L_L = |1,57 - 1,93| = 0,36$$

$$R_C - C_C = |1,57 - 9,76| = 8,19$$

$$R_C - C_L = |1,57 - 9,94| = 8,37$$

$$R_L - L_C = |1,68 - 1,95| = 0,27$$

$$R_L - L_L = |1,68 - 1,93| = 0,25$$

$$R_L - C_C = |1,68 - 9,76| = 8,08$$

$$R_L - C_L = |1,68 - 9,94| = 8,26$$

$$L_C - L_L = |1,95 - 1,93| = 0,02$$

$$L_C - C_C = |1,95 - 9,76| = 7,81$$

$$L_C - C_L = |1,95 - 9,94| = 7,99$$

$$C_C - C_L = |9,76 - 9,94| = 0,18$$

Donde los subíndices “c y l” corresponden a mediciones en el alimentador de carga y en el alimentador de línea respectivamente.

Al analizar los resultados de la comparación de medias por el método *LSD*, podemos observar claramente que aquellos pares de medias que son significativamente diferentes son los que conllevan la comparación de cargas L y R, acompañadas por un elemento capacitivo ($R_C - C_C$, $R_C - C_L$, $R_L - C_C$, $R_L - C_L$, $L_C - C_C$ y $L_C - C_L$); esto debido a la resonancia causada por las cargas capacitivas que genera alta THDi. Por otra parte, se observa claramente que las medias entre factores correspondientes a la misma carga ($R_C - R_L$, $L_C - L_L$ y $C_C - C_L$), son iguales; lo que significa que entre la THDi del lado de carga y del lado del suministro eléctrico también son iguales. Con esto se puede determinar que la distorsión armónica de fondo no afecta a las cargas y que los parámetros



eléctricos en el alimentador, son adecuados para ser tomados como base en este estudio.

Al comparar la THDi en el alimentador de RED contra los niveles de THDi en el alimentador hacia la carga (R, L, C), con el inversor #2 en alta generación (4,5 A), se encontraron diferencias significativas en los niveles de THDi existentes en el alimentador de RED en comparación con los niveles en el alimentador hacia la carga, cuando el inversor #2 opera en alta generación (4,5 A), siendo mayor en RED cuando se alimentan cargas resistivas. Por otro lado, al comparar la THDi en el alimentador de RED con cargas (R, L, C), sin alimentación del inversor, contra el THDi en el mismo alimentador con igual patrón de cargas, pero con el inversor #2 en alta generación (4,5 A), la THDi es significativamente mayor en el alimentador de RED para todos los tipos de carga, pero teniendo valores mayores de THDi para cargas resistivas cuando el inversor #2 genera alta corriente (4,5 A) en comparación con la THDi en el mismo alimentador sin el inversor conectado al nodo; con lo que queda de manifiesto que el conjunto experimental conformado por el inversor #2 que alimenta cargas resistivas en generación alta, es el arreglo que conlleva una mayor generación de armónicas en el alimentador de RED.

En la tabla 2 se muestran los datos del arreglo factorial completo y la tabla ANDEVA resultante.

Tabla 2. Arreglo factorial completo, a) Datos para el arreglo factorial, b) Tabla ANDEVA

Alimentador de RED										
I. INVOLAR	I. ABB 0 A			I. ABB 1,0 A			I. ABB 4,5 A			Tl...
	Carga R	Carga L	Carga C	Carga R	Carga L	Carga C	Carga R	Carga L	Carga C	
0 A	4,59	5,86	9,80	6,34	5,76	14,23	10,75	3,62	11,54	145,98
1,0 A	7,21	5,36	13,35	8,30	4,87	14,96	8,49	3,47	11,74	153,98
4,5 A	12,59	4,82	15,03	10,72	4,56	13,87	5,87	3,52	8,62	156,85
T.J.	156,07			164,41			136,33			456,81

A x B x C	I. ABB (0 A)			I. ABB (1,0 A)			I. ABB (4,5 A)			Factor
I. INVOLAR (0 A)	Carga R	Carga L	Carga C	Carga R	Carga L	Carga C	Carga R	Carga L	Carga C	
I. INVOLAR (0 A)	9,59	11,53	19,81	13,25	11,63	27,65	22,14	7,09	23,29	145,98
I. INVOLAR (1,0 A)	13,73	10,72	26,75	16,15	9,76	28,73	17,65	7,11	23,38	153,98
I. INVOLAR (4,5 A)	25,51	9,32	29,11	21,26	8,92	27,06	11,66	7,22	16,79	156,85

A x B	Carga R	Carga L	Carga C	A x C	I. INVOLAR (0 A)	I. INVOLAR (1,0 A)	I. INVOLAR (4,5 A)
I. ABB (0 A)	48,83	31,57	75,67	I. ABB (0 A)	40,93	52,53	52,52
I. ABB (1,0 A)	50,66	30,31	83,44	I. ABB (1,0 A)	51,20	54,64	48,14
I. ABB (4,5 A)	51,45	21,42	63,46	I. ABB (4,5 A)	63,94	57,24	35,67
Factor B	150,94	83,30	222,57	Factor C	156,07	164,41	136,33

B x C	I. INVOLAR (0 A)	I. INVOLAR (1,0 A)	I. INVOLAR (4,5 A)
Carga R	44,98	47,53	58,43
Carga L	30,25	27,59	25,46
Carga C	70,75	78,86	72,96

B	F.V.	S.C.	g.l.	C.M.	F _{exp}	F _{critica (0,05;21;2)}
Factor A (I. ABB)		23,11	2	11,59	100,74	3,35
Factor B (Carga R, L, C)		538,93	2	269,462	2349,64	3,35
Factor C (I. INVOLAR)		3,53	2	1,76	15,37	3,35
A x B		21,51	4	5,38	46,90	2,73
A x C		68,10	4	17,02	148,45	2,73
B x C		21,27	4	5,32	46,36	2,73
A x B x C		60,98	8	7,62	66,46	2,31
Error		3,10	27	0,11		
TOTAL		740,51	53			

Basándonos en los resultados de la tabla ANDEVA para el arreglo factorial, podemos observar que los factores más determinantes en cuanto a los niveles de THDi en los alimentadores analizados, son las cargas, la interacción de ambos inversores en el nodo de interconexión, así como el inversor #2. En la figura 3 se muestra gráficamente el comportamiento estadístico de la interacción entre el inversor central y la carga visto desde el lado de la RED, mostrando los niveles en los cuales la THDi presenta un valor mayor.

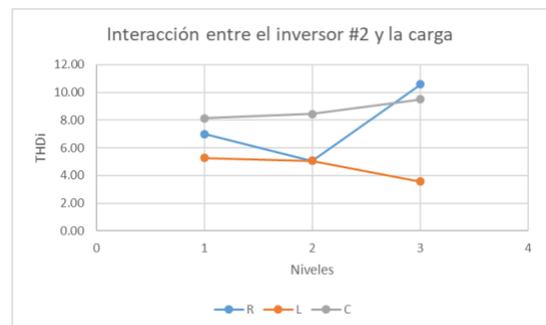


Figura 3. Comportamiento del THDi debido a la interacción entre el inversor #2 y la carga.



Como puede observarse, los resultados de la aplicación de las herramientas de DDE (ANDEVA y arreglos factoriales) tiene como primer resultado, la identificación de los factores que influyen mayormente en la aparición de corrientes armónicas en el alimentador de RED; y, en segundo lugar, se ha podido determinar los efectos que tienen las interacciones de los mismos sobre el fenómeno armónico. Es importante mencionar que varias de las investigaciones sobre el análisis CEE en sistemas FV integrados a redes eléctricas convencionales no consideran la aplicación de estas metodologías (carentes de evidencia estadística).

El utilizar este tipo de herramientas nos ayuda a dar robustez estadística a el análisis de datos, así como a determinar la existencia de diferencias significativas entre grupos de medias definidas como variables de respuesta (en este caso el THDi en el alimentador de RED); identificando las condiciones óptimas del proceso que maximizan la respuesta, evitando sesgos en la información por errores de muestreo o variables perturbadoras.

Por otra parte, es importante considerar que estas metodologías presuponen que los datos se distribuyen uniformemente y que las desviaciones estándar son iguales o similares entre los grupos; además de ser un procedimiento considerado como tardado y difícil de aplicar por el manejo de las variables.

6. Futuros trabajos

Tomando en cuenta los resultados obtenidos, se podrán realizar a futuro trabajos concernientes al análisis frecuencial del comportamiento armónico bajo las condiciones más críticas de generación de corrientes armónicas en la red de suministro, así como la predicción de dicho comportamiento utilizando las herramientas de aprendizaje profundo y redes neuronales.

7. Conclusiones

En ausencia de los inversores, los niveles de THDi en el alimentador de RED no aumentan cuando se alimentan cargas R, L y C, lo que muestra muy poca influencia en la distorsión de fondo, sobre la distorsión armónica. Las corrientes armónicas generadas por los inversores dependen del tipo de inversor y son inyectadas al nodo de interconexión, siendo mayor su distorsión armónica cuando se alimentan cargas resistivas; las armónicas de corriente generadas por los inversores aparecen predominantemente el alimentador de RED en comparación con los niveles de armónicos en el alimentador hacia la carga. El arreglo más desfavorable que implica mayor distorsión armónica de corriente en el alimentador de RED, está conformado por el inversor #2 con alta generación (4,5 A) alimentando cargas resistivas. El uso de herramientas como la ANDEVA y los arreglos factoriales muestran claramente las condiciones más desfavorables en donde el flujo de armónicas de corriente aparece en mayor medida en el alimentador de RED, pese a ser un método complejo de aplicar.

8.- Reconocimiento de autoría

Adán Alberto Jumilla Corral: Conceptualización; Metodología; Validación; Análisis formal; Investigación; Recursos; Escritura: Borrador original; Supervisión; Administración de proyecto; Adquisición de fondos. *Zulma Yadira Medrano Hurtado:* Conceptualización; Análisis formal; Validación; Investigación; Escritura: Revisión y edición. *Pedro Mayorga Ortiz:* Conceptualización; Análisis formal; Validación; Curación de datos; Recursos; Adquisición de fondos. *Hernán Daniel Magaña Almaguer:* Conceptualización; Validación; Investigación; Recursos; Adquisición de fondos. *Mario Alberto Camarillo Ramos:* Conceptualización; Metodología; Análisis



formal; Escritura: Revisión y edición; Visualización.

Referencias

- [1] P Venkata, Subramanyam, C Vyjayanthi "Integration of PV and Battery System to the Grid with Power Quality Improvement Features using Bidirectional AC-DC Converter" IEEE, International Conference on Electrical Power and Energy Systems, 2016, pp 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICEPES.2016.7915918>
- [2] A. Alonso, F. Marafão, F. Gonçalves, H. Paredes, A. Martins, Brandao, "PV Microgeneration Perspective in Brazil" IEEE, Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference, 2017, pp 1-8.
- [3] C. Shiva, R. Bhavani, N. Rathina, "Power Quality Improvement in a Grid Integrated Solar PV System" IEEE, International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing, 2017, pp 1-6. <https://doi.org/10.1109/ITCOSP.2017.8303144>
- [4] L. Campanhol, S. Oliveira, A. de Oliveira, V. Dario, "Power Flow and Stability Analyses of a Multifunctional Distributed Generation System Integrating a Photovoltaic System with Unified Power Quality Conditioner" IEEE, Transactions on Power Electronics, Vol. 34, No. 7, 2019, pp 1-16. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2873503>
- [5] W. Ibrahim, W. Abdalaziz, "Impact of Grid Connected Photovoltaic System on Total Harmonics Distortion (THD) of Low Voltage Distribution Network: A Case Study" IEEE, 2018, pp 1-7.
- [6] A. Kumar, V. Pawar, M. Joshi, V. Agarwal, D. Chandran, "A Solar PV Retrofit Solution for Residential Battery Inverters" IEEE, 44th Photovoltaic Specialist Conference, 2017, pp 1-5.
- [7] K. Mohammad, A. Ibrahim "Power Quality Characteristic of Residential Grid-Connected Inverter of Photovoltaic Solar System" IEEE, 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 2017, pp 1-5.
- [8] S. Oyegoke, Y. Habtay, S. Skarvelis, "Contribution of inverter based photovoltaic generators to power quality at low voltage" IEEE, 50th International Universities Power Engineering Conference, 2015, pp 1-6. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2015.7339824>
- [9] A. Mohammed, F. Mohammed, M. Ibrahim, "Grid Connected Photovoltaic System" IEEE, International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE), Khartoum, Sudan, 2017, pp 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICCCCEE.2017.7867659>
- [10] J. Watson, N. Watson, "Impact of Residential PV on Harmonic Levels in New Zealand" IEEE, PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, 2017, pp 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2017.8260144>
- [11] J. Jana, K. Das, "Trends and challenges of next generation grid connected photovoltaic inverter - an overview" IEEE, Australasian Universities Power Engineering Conference, 2017, pp 1-6. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2017.8282484>
- [12] R. Anurangi, A. Rodrigo, U. Jayatunga, "Effects of High Levels of Harmonic Penetration in Distribution Networks with Photovoltaic Inverters" IEEE, International Conference on Industrial and Information Systems, 2017, pp 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICIINFS.2017.8300335>
- [13] H. Dghim, A. EL-Naggar, I. Erlich, "Harmonic Distortion in Low Voltage Grid with Grid-Connected Photovoltaic" IEEE, 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2018, pp 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378851>
- [14] D. Chathurangi, U. Jayatunga, M. Rathnayake, A. Wickramasinghe, A. Agalgaonkar, S. Perera, "Potential Power Quality Impacts on LV Distribution Networks with High Penetration Levels of Solar PV" IEEE, 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2018, pp 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378890>
- [15] C. Hicks, Y. Baghzouz, S. Haddad, "Power Quality of Residential PV System under Low Solar



Irradiance and Off-Grid Operation" IEEE, 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2018, pp 1-6.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378937>

[16] J. Bincy, "Grid Integration of PV Systems-Issues and Requirements" IEEE, International Conference on Circuits and Systems, 2017, pp 1-5.

[17] N. Phannil, C. Jettanasen, A. Ngaopitakkul, "Power Quality Analysis of Grid Connected Solar Power Inverter" 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia, 2017, pp 1-6.
<https://doi.org/10.1109/IFEEEC.2017.7992269>

[18] G. Boneya, P. Chao, W. Li, L. Yang, L. Zhang, X. Liu, "Modeling of a Two-tage Photovoltaic System for Grid Code Compatibility" IEEE, Conference on Energy Internet and Energy System Integration, 2018, pp 1-6.

[19] Y. Yang, K. Zhou, F. Blaabjerg, "Current Harmonics from Single-Phase Grid-Connected Inverters-Examination and Suppression" IEEE, Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 4, No. 1, 2016, pp 1-13.
<https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2504845>

[20] Y. Aparna, J. Khobragade, "Single Phase Single Stage Grid Connected PV System with Improved Power Quality" IEEE, International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques, 2016, pp 1-5.

[21] E. Balan, "The Impact of Photovoltaic Power Plants Connected into 20 kV Public Grid at Electrical Rumania-Mures. PV 2.8 MW Case Study" IEEE, 7th International Conference on Modern Power System, 2017, pp 1-5.

[22] F. Pinhabel, A. Matheus, F. Goncalves, D. Iglesias, Member, A. Germano, H. Kelis, "Trends and Constraints on Brazilian Photovoltaic Industry: Energy Policies, Interconnection Codes, and Equipment Certification" IEEE, Transactions on Industry Applications, Vol. 54, No. 5, 2018, pp 1-11.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2833422>

[23] X. Wang and F. Blaabjerg, "Harmonic Stability in Power Electronic Based Power Systems: Concept

Modeling and Analysis," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 10, pp. 1, Mar. 2018.
<https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2812712>

[24] C. Li, "Unstable Operation of Photovoltaic Inverter from Field Experiences," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 33, no. 2, pp. 1013-1015, Jan. 2017.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2656020>

[25] S. Abhiram, K. Llango, and A. M. Narayanan, "The Impacts of Rooftop Solar PV Systems on Secondary Distribution System and Advanced Net Metering," in 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), Bangalore, India, 2018, pp. 189-194.
<https://doi.org/10.1109/RTEICT42901.2018.9012513>

[26] T. Taylor, O. Gonzalez, and Y. Baghzouz, "Analysis of current distortion in a 12kW photovoltaic system installation," in 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp. 243-248.
<https://doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783432>

[27] L. Monteiro, W. do Couto, G. Amaral, J. Vitor, V. Flores, W. Negrão, P. Ferreira, A. Schichman, T. Rodrigues, and B. Marciano, "Assessment of Harmonic Distortion in small grid-connected photovoltaic systems," in 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp. 810-816.

[28] R. Vieira, M. Izabel, and S. Bandeira, "Analysis of the Power Quality of a Grid-Connected Photovoltaic System," IEEE Latin America Transactions, vol. 18, no. 4, pp. 714-721, Apr., 2020. <https://doi.org/10.1109/TLA.2020.9082214>

[29] A. Vinayagam, A. Aziz, B. PM, J. Chandran, V. Veerasamy, and A. Gargoom, "Harmonics assessment and mitigation in a photovoltaic integrated network," Sustainable Energy, Grids and Networks, vol.20, pp. 100-254, Oct. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100264>



- [30] M. da Silva, "Dimensional Analysis of Geometric Figures through Computer Vision" IEEE, International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering, 2015, pp 1-6.
- [31] M. Astorga, B. Flores, M. Gil, J. García, F. González, J. Ibarra, M. Lam, "Design of Experiments applied to a Software Engineering Project based on Knowledge Processes" IEEE, 6th International Conference in Software Engineering Research and Innovation, 2018, pp 1-7.
- [32] P. Quang, B. Azizur, "Optimization of defected-core photonic crystal fiber for salt solution sensing using finite element method and factorial analysis" IEEE, International Conference on Advanced Technologies for Communications, 2015, pp 1-6.
- [33] S. Dahbi, H. El Moussami, L. Ezzine, "Multiple Regression Model for Surface Roughness Using Full Factorial Design" IEEE, 6th IESM Conference, 2015, pp 1-6. <https://doi.org/10.1109/IESM.2015.7380194>
- [34] A. Salami, F. Ghassemi, M. Hassan, "Criterion to Evaluate Feature Vectors Based on ANOVA Statistical Analysis" IEEE, 24th national and 2nd International Iranian Conference on Biomedical Engineering, 2017, pp 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICBME.2017.8430266>
- [35] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, 6th ed., John Wiley & Sons, 2005.
- [36] H. Gutiérrez, S. De la Vara, Análisis y diseño de experimentos. Mc Graw Hill, 2008.
- [37] Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, CENELEC Std. EN-50160, Jul. 2010.

Derechos de Autor (c) 2023 Adán Alberto Jumilla Corral, Zulma Yadira Medrano Hurtado, Pedro Mayorga Ortiz, Hernán Daniel Magaña Almaguer, Mario Alberto Camarillo Ramos



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)