

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA DOCTORADO
EN INGENIERÍA



CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DE LA DISTORSIÓN DE CORRIENTE
ARMÓNICA EN REDES ELÉCTRICAS CON INTEGRACIÓN DE POTENCIA
FOTOVOLTAICA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ADÁN ALBERTO JUMILLA CORRAL

DIRECTOR DE TESIS:
DR. HÉCTOR ENRIQUE CAMPBELL RAMÍREZ

CODIRECTORES DE TESIS:
DRA. ZULMA YADIRA MEDRANO HURTADO, DR. PEDRO MAYORGA ORTIZ

Mexicali, Baja California, octubre de 2021

para Aurea con todo mi amor...

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo técnico y económico otorgado para la realización de este proyecto de investigación, así como a la Universidad Autónoma de Baja California por arroparme en sus aulas y convertirse en mi segunda alma mater.

Expreso mi gratitud al Instituto de Ingeniería de la UABC, así como al Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MyDCI) por el apoyo material y humano que me brindaron durante estos cuatro años de trabajo académico.

Reconozco la importancia de la ayuda recibida por parte del Instituto Tecnológico de Mexicali, muy en especial a la Dirección encabezada por el M.C. Alfredo Villalba Rodríguez, junto con el Dr. Hernán Magaña Almaguer, el M.C. Francisco Ibáñez Salas y el Ing. Noé Pineda Cisneros; así como también a las Academias de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, y al Departamento de Ingeniería Eléctrica-Electrónica.

Correspondo a los miembros de la Delegación Sindical del Instituto Tecnológico de Mexicali, Lic. Marco Antonio Montaña, Lic. Raúl Soto Prado, Ing. Felipe Arturo Rodríguez y al M.C. Moisés Zavala Sánchez; por sus invaluable muestras de respaldo y palabras de aliento oportunas y sinceras.

A mis mentores, el M.C. Eliezer Suarez Flores, el M.C. Ricardo Bermúdez Menchaca y al Ing. Roberto Espinoza Rodríguez, les doy las gracias por el apoyo y amistad brindadas durante la realización de mis estudios de posgrado.

Agradezco la ayuda y apoyo de los Ingenieros Mario Camarillo Ramos, Eloim Arreola Sánchez, Roberto Lomelí Pavón, Alejandro Rioseco Carrasco, Ignacio Chavira Soto, Apolonio Reyes Castro, Carlos Raygosa Casas y Víctor Argüelles Quirino, quienes me brindaron su respaldo en esta aventura académica, compartiendo los éxitos y sinsabores durante la estancia en el programa de doctorado.

Doy las gracias a los Doctores, Pedro Rosales Escobedo, Edgar Valenzuela Mondaca, Alejandro Lambert Arista y Alejandro Suástegui Macías, por sus invaluable comentarios y recomendaciones que realizaron a este trabajo de investigación, durante su participación como evaluadores en la asignatura de actividades de investigación.

Finalmente, expreso mis más sinceros agradecimientos a la Doctora Zulma Yadira Medrano

Hurtado, así como a los Doctores Pedro Mayorga Ortiz, Héctor Enrique Campbell Ramírez, Roberto López Avitia, y a mi tutor académico y director de tesis el Dr. Carlos Pérez Tello; quienes en las aulas me otorgaron las herramientas para desarrollar y llevar a buen término este trabajo de investigación, y fuera de ellas, me enseñan día con día, el camino a seguir para mejorar como ser humano.

RESUMEN

La necesidad de aumentar la matriz energética actual y la preocupación por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, han sido, entre otros factores, los que promueven el uso cada vez más constante de las fuentes alternas de generación eléctrica. La incorporación de energía renovable e intermitente a gran escala en las redes eléctricas existentes, ha ido en aumento significativamente en la última década. Sin embargo, esta integración plantea muchos desafíos operativos y de control, que dificultan el funcionamiento confiable y estable de las redes eléctricas; esto debido a los problemas de calidad de la energía que se presentan, sobre todo en lo que respecta a la distorsión armónica de corriente y de voltaje. Este trabajo de investigación tiene como objetivo caracterizar el comportamiento del contenido armónico de corriente eléctrica en una red de suministro en baja tensión, con integración mediante inversores de estado sólido (electrónicos), de la potencia generada por un sistema solar fotovoltaico; además de generar un modelo para proyectar el comportamiento futuro del contenido armónico de corriente eléctrica en los sistemas anteriormente descritos, utilizando redes neuronales artificiales recurrentes como herramienta de modelación.

En la primera parte de los trabajos de investigación, se llevó a cabo un estudio del comportamiento estadístico de la corriente armónica en un nodo de carga alimentado en forma conjunta, por una red de suministro de electricidad y fuentes de energía fotovoltaica, a través de inversores electrónicos de potencia interconectados en el mismo nodo. Este análisis se realizó mediante de un diseño de experimentos utilizando la comparación de medias y arreglos factoriales completos, esto con el propósito de obtener un conocimiento inicial sobre el sistema en estudio, definiendo los factores en los que se deberían enfocar los trabajos a desarrollar. Se aplicó una metodología utilizando un banco de pruebas conformado por dos arreglos fotovoltaicos, el primer arreglo fue conformado por 6 paneles solares monocristalinos con una potencia máxima por panel de 250W y un voltaje en máxima potencia de 31.1 volts. El segundo arreglo fotovoltaico constó de 6 paneles policristalinos con una potencia máxima por panel de 250W y un voltaje en máxima potencia de 31.7 volts. La salida de potencia del arreglo monocristalino fue conectado a un inversor central para interconexión a la red de suministro, del tipo controlado por voltaje, configuración de puente completo, alta velocidad de conmutación y con una capacidad de 3,000 W; entregando en el punto de acoplamiento común 220/127 volts, 2 fases, 3 hilos. Cada panel del arreglo policristalino fue conectado a las terminales de entrada de un microinversor controlado por

corriente y disparo por modulación de ancho de pulso (6 en total), de 250 W y con un voltaje de salida de 220/127 volts de CA, 2 fases, 3 hilos cada uno.

Las salidas de potencia tanto del inversor central, así como del conjunto de microinversores, fueron conectadas al punto de acoplamiento común, que en este caso se conformó por un tablero de distribución eléctrico de 220/127 volts, 100 amperes, 2 fases, 3 hilos. Un tercer alimentador (red de suministro de 220/127 volts, 2 fases, 3 hilos), fue conectado al mismo punto, de tal manera que las tres fuentes pudieran suministrar potencia en forma individual y conjunta; donde se pudieron analizar diferentes escenarios combinando la red de suministro de electricidad, inversores y varios tipos de cargas (resistiva, inductiva y capacitiva). Los factores considerados para el diseño de experimentos fueron los tipos de inversores, los niveles de potencia de generación, así como los tipos de carga. Los resultados obtenidos mostraron que la distorsión de corriente armónica en el nodo de carga depende del tipo de inversor utilizado y de los tipos de carga. También se observó que las corrientes armónicas aparecen en mayor cantidad en la red de suministro, en comparación con los armónicos presentes en las cargas conectadas al nodo en estudio. La combinación de factores estadísticamente más significativos fueron las del inversor central alimentando cargas resistivas, cuando la matriz fotovoltaica presentaba su nivel máximo de generación; concluyendo que esta configuración sería la adecuada para la recolección de datos tendientes a la caracterización, modelado y predicción del comportamiento armónico de la corriente en la red de suministro.

Para el estudio del comportamiento frecuencial de la corriente, se realizó un análisis mediante el uso de herramientas matemáticas y estadísticas, tales como la transformada discreta de Fourier y el algoritmo de la transformada rápida de Fourier, la transformada de tiempo corto de Fourier, y la transformada continua de wavelets; se utilizaron además histogramas y gráficos de caja y bigotes para observar el comportamiento estadístico de las señales. Se desarrolló una metodología para la adquisición y análisis de datos a partir de una tarjeta de adquisición y el uso del programa de cómputo SignalExpress, así como la utilización del entorno de Matlab para el análisis matemático y estadístico. Los resultados mostraron que la distorsión de fondo presente en el sistema bajo estudio no afectaba a la calidad de la onda de corriente, debido a la poca presencia de contenido armónico; sin embargo, la señal de corriente con aportaciones de potencia del inversor presentó un aumento de casi 10 veces en el contenido armónico con referencia a la señal de corriente sin aportaciones del inversor, siendo su componente espectral continuo a lo largo de toda la señal muestreada.

En cuanto al modelado y predicción del comportamiento de la corriente en la red de suministro eléctrico, estos fueron llevados a cabo mediante el uso de redes neuronales artificiales, específicamente con una Red Neuronal No Lineal Autorregresiva con Entradas Externas, en configuraciones de lazo abierto y lazo cerrado. Estas redes fueron estructuradas utilizando la caja de herramientas de aprendizaje profundo de Matlab. Los vectores de magnitud de la señal de corriente en el alimentador del inversor se utilizaron como los parámetros de entrada a la red neuronal artificial, mientras los vectores de magnitud de la señal de corriente en el alimentador de la red de suministro, fue considerada como la salida esperada. Los resultados mostraron que una red neuronal artificial con las características apropiadas, se puede considerar apta para captar la dinámica de este tipo de sistemas. El modelo obtenido presentó gran flexibilidad en cuanto a variedad y cantidad de datos que puede manejar, permitiendo representar y predecir el comportamiento del sistema bajo estudio en largos periodos de tiempo y en diversas condiciones de operación. Además, el algoritmo obtenido tiene la capacidad de ser trasladado a sistemas físicos o virtuales, para el control o reducción de los fenómenos que afectan a las redes eléctricas.

ABSTRACT

The need to increase the current energy matrix and the concern to reduce greenhouse gas emissions, have been, among other factors, those that promote the increasingly constant use of alternative sources of electricity generation. The incorporation of renewable and intermittent energy on a large scale in existing electricity grids has been on a significant increase in the last decade. However, this integration poses many operational and control challenges, which hinder the reliable and stable operation of power grids; This is due to the power quality problems that arise, especially regarding the harmonic distortion of current and voltage. This research work aims to characterize the behavior of the harmonic content of electric current in a low voltage supply grid, with integration through solid state (electronic) inverters, of the power generated by a photovoltaic solar system; in addition to generating a model to project the future behavior of the harmonic content of electric current in the systems described above, using recurrent artificial neural networks as a modeling tool.

First, a study of the statistical behavior of the harmonic current was carried out in a load node powered jointly by an electricity supply grid and photovoltaic energy sources, through inverters power electronics, interconnected in the same node. This analysis was carried out through a design of experiments using means comparison and complete factorial arrangements, with the purpose of obtaining an initial knowledge about the system under study, defining the factors on which the work to be developed should be focused. A methodology was applied using a test bench made up of two photovoltaic arrangements, the first arrangement was made up of 6 monocrystalline solar panels with a maximum power per panel of 250W and a maximum power voltage of 31.1 volts. The second photovoltaic arrangement consisted of 6 polycrystalline panels with a maximum power per panel of 250W and a maximum power voltage of 31.7 volts. The power output of the monocrystalline array was connected to a central inverter for interconnection to the supply grid, of the voltage controlled type, full bridge configuration, high switching speed and with a capacity of 3,000 W; delivering 220/127 volts, 2 phases, 3 wires to the common coupling point. Each panel of the polycrystalline array was connected to the input terminals of a microinverter controlled by current and triggered by pulse width modulation (6 in total), of 250 W and with an output voltage of 220/127 volts AC, 2 phases, 3 wires each one.

The power outputs of both, the central inverter as well as the set of microinverters, were connected to the common coupling point, which in this case was made up of a 220/127 volt, 100 amps, 2 phase, 3 wire electrical distribution board. A third feeder (220/127 volt, 2 phase, 3 wire supply grid) was connected to the same point, in such a way that the three sources could supply power individually and together; where different scenarios could be analyzed combining the

electricity supply grid, inverters and various types of loads (resistive, inductive and capacitive). The factors considered for the design of experiments were the types of inverters, the generation power levels, as well as the types of load. The results obtained showed that the harmonic current distortion in the load node depends on the type of inverter used and the types of load. It was also observed that harmonic currents appear in greater quantity in the supply grid, compared to the harmonics present in the loads connected to the node under study. The most statistically significant combination of factors was those of the central inverter feeding resistive loads, when the photovoltaic array presented its maximum generation level; concluding that this configuration would be adequate for the collection of data aimed at the characterization, modeling and prediction of the harmonic behavior of the current in the supply grid.

For the study of the frequency behavior of the current, an analysis was performed using mathematical and statistical tools, such as the discrete Fourier transform and the fast Fourier transform algorithm, the short-time Fourier transform, and the continuous wavelet transform; Histograms and box-and-whisker plots were also used to observe the statistical behavior of the signals. A methodology was developed for the acquisition and analysis of data from an acquisition card and the use of the SignalExpress software, as well as the use of the Matlab environment for mathematical and statistical analysis. The results showed that the background distortion present in the system under study did not affect the quality of the current wave, due to the low presence of harmonic content; However, the current signal with power inputs from the inverter presented an increase of almost 10 times in the harmonic content with reference to the current signal without inputs from the inverter, its spectral component being continuous throughout the entire sampled signal.

Regarding the modeling and prediction of the behavior of the current in the electrical supply grid, these were carried out through the use of artificial neural networks, specifically with an Autoregressive Nonlinear Neural Network with External Inputs, in open loop and closed loop configurations. These networks were structured using the Matlab deep learning toolbox. The magnitude vectors of the current signal in the inverter feeder were used as the input parameters to the artificial neural network, while the magnitude vectors of the current signal in the supply grid feeder, was considered as the expected output. The results showed that an artificial neural network with the appropriate characteristics can be considered suitable to capture the dynamics of this type of system. The obtained model presented great flexibility in terms of variety and quantity of data that it can handle, allowing to represent and predict the behavior of the system under study over

long periods of time and under various operating conditions. In addition, the algorithm obtained has the ability to be transferred to physical or virtual systems, to control or reduce the phenomena that affect electrical grids.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN.....	1
----------------------	---

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
A. Objetivos, Preguntas de la Investigación e Hipótesis.....	4
B. Justificación	5
C. Viabilidad y Alcance de la Investigación	7
D. Evaluación de las Deficiencias en el Conocimiento del Problema	7
III. ESTADO DEL ARTE.....	9
A. Análisis Armónico en Redes con Integración de Energía Fotovoltaica	9
1) Mediciones en Tiempo Real	9
2) Caracterización Armónica Mediante Modelado y Simulación.....	16
3) Modelado y Predicción Mediante Redes Neuronales Artificiales	20
IV. MARCO TEÓRICO	24
A. El Concepto de Calidad de la Energía Eléctrica.....	25
B. Antecedentes de la Calidad de la Energía Eléctrica	27
C. Importancia de la Calidad de la Energía Eléctrica.....	29
D. El Costo de la Calidad de la Energía Eléctrica.....	30
E. Los Nuevos Retos de la Calidad de la Energía Eléctrica.....	31
F. La Distorsión Armónica.....	34
G. Caracterización de la Distorsión Armónica.....	35
H. El Modelado de la Distorsión Armónica	40
I. Red Neuronal Artificial Recurrente	42
V. METODOLOGÍA	45
A. Equipo de Medición, Monitoreo y Adquisición de Datos	48
B. Normas y Reglamentos.....	50
C. Pasos para el Desarrollo de la Investigación	52
VI. DESARROLLO	56
A. Construcción del Banco de Pruebas	56
B. Configuración del Analizador de Redes Eléctricas	61
C. El Diseño de Experimentos	61
D. Análisis de las Señales	68
E. Recolección de Datos para el Modelado y Predicción	72
F. Modelado y Predicción del Fenómeno Armónico	76
VII. RESULTADOS	82

VIII. CONCLUSIONES	101
IX. REFERENCIAS	105
X. ANEXOS	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Problemas de CEE y sus características, IEEE 1159	28
Tabla II. Experimentos para el ANDEVA	62
Tabla III. ANDEVA para el caso número 1 de la Tabla II: a) Tabla de datos. b) Tabla para el ANDEVA	64
Tabla IV. Experimento factorial completo: a) Tabla de datos. b) Tabla para el ANDEVA	65
Tabla V. Descripción y condiciones de la adquisición de datos para la caracterización	71
Tabla VI. Descripción y condiciones de la adquisición de datos para el modelado y predicción .	74
Tabla VII. Armónicas de la señal de corriente en la red de suministro sin aportaciones del inversor	86
Tabla VIII. Armónicas de la señal de corriente en la red de suministro con aportaciones del inversor	92
Tabla IX. mse en modelado y predicción	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Esquemas de generación eléctrica: (a) Generación centralizada. (b) Generación distribuida	32
Fig. 2. Distorsión armónica de voltaje con sus parámetros característicos	34
Fig. 3. Estructura básica de una RNA	41
Fig. 4. Modelo matemático de una neurona artificial.....	42
Fig. 5. RNA recurrente	43
Fig. 6. Arquitectura de la red NARX: (a) Red de lazo abierto (serie-paralelo). (b) Red de lazo cerrado (paralelo)	44
Fig. 7. Diagrama unifilar del sistema eléctrico bajo estudio	47

Fig. 8. Analizador de redes eléctricas Fluke, modelo 435 serie II	49
Fig. 9. Sensor de corriente de efecto Hall modelo ACS712-20	49
Fig. 10. Tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6008, de National Instruments	50
Fig. 11. Diagrama esquemático general del banco de pruebas	57
Fig. 12. Diagrama de conexiones de los alimentadores al PCC y hacia las cargas	57
Fig. 13. Diagramas esquemáticos para la conexión de módulos e inversores: a) Sistema con paneles monocristalinos. b) Sistema con paneles policristalinos	58
Fig. 14. Imágenes de los elementos que constituyen el banco de pruebas	60
Fig. 15. Pantallas del analizador de redes eléctricas: a) Pantalla menú de opciones. b) Pantalla THD e IHD de corriente	61
Fig. 16. Disposición del banco de pruebas para la adquisición de datos tendientes a la caracterización de las señales, mostrando los elementos que lo componen	68
Fig. 17. Imágenes del banco de pruebas para la adquisición de datos en el alimentador de red, tendientes a la caracterización de las señales	69
Fig. 18. Diagrama de conexión de dispositivos para la adquisición de datos utilizados en la caracterización de las señales.	70
Fig. 19. Imágenes del sistema de adquisición de datos para la caracterización, mostrando la conexión del sensor de corriente y la TAD.	71
Fig. 20. Disposición de elementos en el banco de pruebas para la adquisición de datos a utilizar en el modelado y predicción del fenómeno armónico	72
Fig. 21. Diagrama de conexión de dispositivos para la adquisición de datos utilizados en el modelado y predicción de la distorsión armónica de corriente	73
Fig. 22. Imágenes del sistema de adquisición de datos para el modelado y predicción de la corriente armónica en el alimentador de red	74
Fig. 23. Corriente en el alimentador de red sin aportaciones del sistema FV	75
Fig. 24. Corrientes en la red de suministro y en el inversor alimentando simultáneamente carga resistiva	76
Fig. 25. Arquitectura de las redes NARX configuradas: a) Arquitectura serie-paralelo (lazo abierto). b) Arquitectura en paralelo (lazo cerrado)	79
Fig. 25a. a) Ventana de ejecución del algoritmo en MatLab. b) Arquitectura serie-paralelo (lazo abierto). c) Arquitectura en paralelo (lazo cerrado); entregadas ambas por MatLab.	82
Fig. 26. Señal de corriente en el lado de la red de suministro sin aportaciones del inversor	83
Fig. 27. Histograma de la señal de corriente en el lado de la red de suministro sin aportaciones del inversor	84

Fig. 28. Gráfico de caja y bigotes de la señal de corriente en el lado de la red de suministro sin aportaciones del inversor	85
Fig. 29. Espectro en frecuencia de la señal de corriente en el lado de la red de suministro sin aportaciones del inversor	86
Fig. 30. Espectrograma de la señal de corriente en el lado de la red de suministro sin aportaciones del inversor	87
Fig. 31. Escalograma de la señal de corriente en la red de suministro sin aportaciones del inversor	88
Fig. 32. Señal de corriente en el lado de la red de suministro con aportaciones del inversor	89
Fig. 33. Histograma de la señal de corriente en el lado de la red de suministro con aportaciones del inversor	90
Fig. 34. Gráfico de caja y bigotes de la señal de corriente en el lado de la red de suministro con aportaciones inversor	91
Fig. 35. Espectro en frecuencia de la señal de corriente en el lado de la red de suministro con aportaciones del inversor	92
Fig. 36. Espectrograma de la señal de corriente en el lado de la red de suministro con aportaciones del inversor	93
Fig. 37. Escalograma de la señal de corriente en la red de suministro con aportaciones del inversor	94
Fig. 38. Desarrollo del entrenamiento, validación y prueba con referencia al número de iteraciones utilizadas y mse obtenido	95
Fig. 39. Histograma del error de las salidas comparado con el objetivo	96
Fig. 40. Regresiones lineales de los conjuntos de datos: a) Regresión de los datos de entrenamiento. b) Regresión de los datos de validación. c) Regresión de los datos de prueba. d) Regresión del total de los datos	97
Fig. 41. Respuesta temporal obtenida y error respecto al objetivo	98
Fig. 42. Autocorrelación error-tiempo	99
Fig. 43. Correlación error-entrada	99

Fig. 44. Comparación de la respuesta temporal de la red de lazo cerrado contra la salida objetivo

.....
100

Fig. 45. Comparación de la respuesta temporal de la red de lazo abierto contra la salida objetivo

.....
101

NOMENCLATURA

#P	Número de polos
°C	Grados Celsius
µs	Microsegundo
A	Corriente
AI	Entrada analógica
ANDEVA	Análisis de la varianza
AO	Salida analógica
BT	Baja tensión
$\hat{c}(t)$	Transformada de Hilbert de la función de modo empírico
$c(t)$	Función de modo empírico
CA	Corriente alterna
CC	Carga capacitiva
C_C	Medición en el alimentador hacia la carga (con carga capacitiva)
CD	Corriente directa
CEE	Calidad de la energía eléctrica
CF	Factor cresta
CFi	Factor cresta de corriente
CFv	Factor cresta de voltaje
CL	Carga inductiva
C_L	Medición en el alimentador hacia la línea (con carga capacitiva)
CR	Carga resistiva
CWT	Transformada continua de wavelet

DDE	Diseño de experimentos
DFT	Transformada discreta de Fourier
EMD	Descomposición en modos empíricos de la señal
Fexp	Niveles críticos asociados a “Fo”
FFT	Transformada rápida de Fourier
Fo	Estadísticos “F”
fo	Frecuencia de salida
FV	Fotovoltaico/Fotovoltaica
g.l.	Grados de libertad
GND	Terminal de tierra
H	Armónica
H	Hilo
HF	Factor armónico
HSA	Transformada de Hilbert
Hz	Hertz
I ₁	Valor efectivo de la componente fundamental de Corriente
IHDin	Distorsión armónica individual de corriente
IHDn	Distorsión armónica individual
IHDvn	Distorsión armónica individual de voltaje
I _L	Corriente de demanda máxima
I _n	Valor efectivo de la <i>n</i> -ésima corriente armónica
IP-	Terminal de salida de corriente
I _p	Amplitud pico de corriente
IP+	Terminal de entrada de corriente
I _{rms}	Corriente eficaz
I _{RSS}	Valor efectivo total de corriente
kAsim	Kiloamperes simétricos
kHz	Kilohertz

kVA	Kilovolts-amperes
kW	Kilowatt
kWp	Kilowatt pico
L _C	Medición en el alimentador hacia la carga (con carga inductiva)
LED	Diodo emisor de luz
L _L	Medición en el alimentador hacia la línea (con carga inductiva)
M.I.	Microinversor
MHz	Megahertz
min	minuto
MS	Media cuadrática
ms	milisegundo
mse	Error medio cuadrático
MVA	Megavolts-amperes
MVA _r	Megavolts-amperes-reactivos
MW	Megawatts
N	Neutro
NARX	Redes neuronales no lineales autorregresivas con entradas externas
ns	nanosegundo
P	Valor principal de Cauchy
p.u.	por unidad
PC	Computadora personal
PCC	Punto de acoplamiento común
PWM	Modulación de ancho de pulso
R _C	Medición en el alimentador hacia la carga (con carga resistiva)
RES	Red eléctrica del suministrador
R _L	Medición en el alimentador hacia la línea (con carga resistiva)
Rms	Raíz cuadrática media
RNA	Red neuronal artificial

RSS	Valor efectivo total
s	segundo
SS	Suma de cuadrados
STFT	Transformada de tiempo corto de Fourier
T	Tierra
T.j	Total del j-esimo elemento
TAD	Tarjeta de adquisición de datos
TDD	Distorsión de la demanda total
TDL	Línea de retardo intervenida
THD	Distorsión armónica total
THDi	Distorsión armónica total de corriente
THDv	Distorsión armónica total de voltaje
T-I	Tiempo-corriente
V	Voltaje
V ₁	Valor efectivo de la componente fundamental de voltaje
VAr	Volts-amperes reactivos
Vcc	Terminal de voltaje directo
Vcd	Señal de voltaje directo
Vi	Voltaje de entrada
VIout	Terminal de salida del sensor de corriente
Vn	Valor efectivo de la enésima tensión armónica
Vo	Voltaje de salida
Vp	Amplitud pico de voltaje
Vrms	Voltaje eficaz
V _{RSS}	Valor efectivo total de voltaje
VSI	Inversor con fuente de voltaje
W	Watts
Wp	Watts pico

$x(t)$	Señal bajo análisis
$x[n]$	Señal bajo análisis
$y(t)$	Señal de salida
Y_j	Media del j -ésimo elemento
$\omega(t-\tau)$	Función ventana ψ
Wavelet madre	

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, entre los recursos renovables no convencionales que se utilizan en la generación de electricidad, se encuentra la energía solar fotovoltaica (FV). Esta tecnología consiste en la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica, aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores mediante las celdas FV. Ser una energía natural proveniente del sol, inagotable, renovable y de gran disponibilidad, son características que definen la importancia del recurso FV.

Entre las ventajas de los sistemas de generación FV podemos mencionar el poco impacto ambiental en relación con otras tecnologías, por lo que se le considera una energía limpia, además de poder obtenerse electricidad a un menor costo y emplearse para una gran variedad de usos [1], [2]. Entre las desventajas principales resalta la gran inversión inicial (aunque sus costos evolucionan a la baja de forma sostenida, mientras que la tendencia general de costos de los combustibles fósiles es la opuesta), así como la necesidad de grandes superficies destinadas a la instalación de los paneles solares. Otra dificultad que se presenta en estos sistemas de generación es la inestabilidad de la radiación solar, siendo variable e intermitente la cantidad de energía que podemos generar; esto puede representar un problema al momento de considerar la capacidad de almacenamiento de energía en bancos de baterías (en sistemas aislados), o en la calidad del suministro de potencia hacia la red eléctrica, en caso de sistemas interconectados [3].

Los parámetros de la potencia entregada por los paneles FV son de forma de onda directa (voltaje directo y corriente directa -CD-), por lo que es necesario transformarlos en parámetros con forma de onda sinusoidal (alterna), con características de amplitud y frecuencia adecuadas para ser integrados a las redes eléctricas (en sistemas interconectados). El acondicionamiento, interconexión e integración de la potencia eléctrica generada por el arreglo FV, se realiza mediante inversores de potencia.

Los inversores de potencia son definidos como dispositivos electrónicos de estado sólido, que permiten integrar la energía FV generada en la red de suministro, y que tienen como función elemental tomar la señal de CD de entrada, con un voltaje de entrada directo (V_i), y convertirla a una señal de corriente alterna (CA) de salida, con un voltaje de salida alterno (V_o) y una frecuencia de salida (f_o) [4]. Esta conversión debe ser llevada a cabo de tal forma, que las características de las ondas de salida del inversor se deben adaptar a las condiciones de la red en el punto

de interconexión (punto de acoplamiento común -PCC, por sus siglas en inglés-), sin causar perturbaciones ni cambios en las especificaciones de suministro en la red eléctrica o en los demás usuarios [5]-[8].

En cuanto a al funcionamiento esperado, los inversores FV deben entregar una señal de onda sinusoidal de salida pura (de voltaje y de corriente), que cumpla con las normatividades vigentes de calidad de la energía eléctrica (CEE) [9]. Sin embargo, esto no ocurre así, ya que la mayoría de los inversores comerciales bajo ciertas condiciones de operación proporcionan una señal distorsionada por el contenido armónico presente en ella (señales de corriente y/o voltaje cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de trabajo -frecuencia fundamental-), en lugar de una señal sinusoidal con características bien definidas [10]-[15]. En sistemas FV de gran potencia donde convergen varios inversores interconectados a la red, la emisión de corriente armónica puede provocar una distorsión en la señal de voltaje. Esta distorsión puede exceder los estándares para las características de voltaje en los sistemas de distribución [16], y aunque los inversores individuales cumplan con el estándar para emisiones de corriente armónica [17], la emisión armónica total de un grupo de inversores que funcionan en paralelo puede sobrepasar los valores máximos permitidos, sin estar cubiertos estos valores por las normas [18]-[20]. Esto conlleva varios efectos no deseados sobre las cargas de los usuarios y en las instalaciones del propio suministrador. Entre algunos de los efectos nocivos producidos por el flujo de corrientes y voltajes armónicos se encuentran el aumento en las pérdidas por efecto Joule en los alimentadores eléctricos, el sobrecalentamiento en conductores puestos a tierra (hilo neutro), la elevación de la temperatura en motores, generadores, transformadores y alimentadores, (reduciendo su vida útil); la vibración en las máquinas eléctricas, la falla de bancos de capacitores, los efectos de resonancia, así como los problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos sensibles e interferencias en sistemas de telecomunicaciones [21], [22].

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La presente investigación tiene como propósito caracterizar el comportamiento de la distorsión armónica de corriente que se presenta en las redes de suministro eléctrico, cuando en ellas se integra potencia proveniente de sistemas de generación FV a través de inversores de estado sólido (inversores electrónicos). Además, se pretende modelar y predecir el fenómeno armónico utilizando Redes Neuronales Artificiales (RNA), con el propósito de analizar, describir, explicar o simular su comportamiento, así como pronosticar la evolución del mismo.

Este estudio se llevará a cabo utilizando un banco de pruebas constituido por 6 paneles solares monocristalinos de 250 W cada uno, para conformar un arreglo de 1,500 W en total. La conversión de CD a CA está a cargo de un inversor central interconectado a la red, del tipo controlado por voltaje, configuración de puente completo, alta velocidad de conmutación y capacidad de 3,000 W; entregando en el lado de CA, 220/127 volts, 2 fases, 3 hilos. El PCC (donde convergen la red de suministro y la generación proveniente del sistema FV), estará conformado por un tablero eléctrico monofásico, 220/127 volts, 100 amperes, a través del cual se alimentan las cargas resistivas con un valor de 530 W en 127 volts.

Para la adquisición de datos se utilizará una tarjeta modelo IN-USB-6008 de National Instruments, que es un dispositivo multifunción con entradas/salidas analógicas y digitales, 12 bits de resolución y 10,000 muestras/segundo. La resolución para el muestreo de dos señales simultáneas es de 5,000 muestras/segundo debido al multiplexor utilizado por la tarjeta de adquisición. Para la conversión de las señales de corriente a voltaje, se emplearán sensores de efecto Hall modelo ACS712. Estos sensores entregan a su salida una señal de voltaje de CA que es proporcional a la corriente de entrada. Mediante el programa de cómputo SignalExpress de National Instrument, los datos serán adquiridos y transportados al programa de cómputo Excel, donde se generarán los vectores correspondientes que alimentarán la RNA.

La caracterización del comportamiento de la distorsión armónica se puede conceptualizar como la actividad de determinar o identificar aquellos rasgos peculiares o propios del fenómeno, que claramente los diferencian de los demás, y que tiene como finalidad clasificar correctamente los patrones que presenta la distorsión armónica generada por los sistemas FV dentro de las redes de suministro eléctrico. Para ello, es necesario procesar la señal distorsionada; enfoques como "tiempo-frecuencia" o "escala de tiempo", mediante el uso de herramientas matemáticas como la Transformada Discreta de Fourier (DFT), la Transformada Rápida de Fourier (FFT), la

Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT) y la Transformada Continua de wavelet (CWT)), serán utilizadas para el análisis de las señales de corriente.

Por otro lado, el modelado se describe como una representación abstracta, conceptual, gráfica o física de los fenómenos, sistemas o procesos, a fin de analizar, describir, explicar o simular su comportamiento. La caracterización y modelado serán llevados a cabo mediante el uso de algoritmos computacionales en el entorno de Matlab, utilizando las herramientas de procesamiento digital de señales y de aprendizaje profundo.

A. Objetivos, Preguntas de la Investigación e Hipótesis

Debido a la problemática inherente al uso de inversores electrónicos para la integración de potencia FV en las redes eléctricas, se determinó llevar a cabo un proyecto que analice de manera integral el fenómeno de distorsión armónica en dichas redes, siendo los objetivos generales que persigue esta investigación los siguientes:

- Caracterizar el comportamiento del contenido armónico de corriente eléctrica en una red de suministro en baja tensión (BT) con integración mediante inversores de estado sólido (electrónicos), de la potencia generada por un sistema solar FV.
- Generar un modelo y proyectar el comportamiento futuro del contenido armónico de corriente eléctrica en los sistemas anteriormente descritos, con RNA como herramienta de modelación.

Para alcanzar el objetivo central, las metas a corto plazo definidas como objetivos específicos de la investigación serán:

- Diseñar un banco de pruebas conformado por módulos FV, inversores, tablero de distribución, módulos de carga e instrumentación, con el fin de tener las condiciones adecuadas para realizar mediciones y captura de datos.
- Establecer un diseño de experimentos (DDE) basado en el análisis de la varianza (ANDEVA) y diseños factoriales completos, así como métodos de comparación de medias; esto con el propósito de identificar las condiciones con mayor generación de armónicas de corriente en la red de suministro bajo prueba.

- Determinar las herramientas estadísticas y matemáticas necesarias, así como los algoritmos computacionales adecuados para el procesamiento digital de las señales de distorsión armónica de corriente.
- Definir dentro de las diversas RNA, el tipo y arquitectura más adecuada para modelar y predecir el comportamiento armónico de la corriente.

Basados en el alcance descrito en los objetivos generales, en esta investigación se plantean las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las características que definen el comportamiento de la distorsión armónica de corriente que se presentan en las redes de suministro eléctrico en BT, debido a la integración de potencia FV mediante el uso de inversores de estado sólido?
- ¿Pueden los modelos computacionales basados en aprendizaje profundo, predecir de manera adecuada el comportamiento de la distorsión de corriente armónica dentro de las redes eléctricas?

Tomando en cuenta las actividades a realizar, así como las preguntas de la investigación, se establece la siguiente hipótesis de trabajo a comprobar: Empleando un algoritmo basado en redes neuronales recurrentes, es posible modelar y predecir el comportamiento del contenido armónico de corriente eléctrica en una red de suministro en BT con integración mediante inversores de estado sólido (electrónicos), de la potencia generada por un sistema solar FV.

B. Justificación

Existe gran interés en el estudio del comportamiento que presentan los sistemas de generación FV interconectados a las redes de suministro eléctrico, sobre todo en lo que respecta a la generación de armónicos de voltaje y de corriente, cuando se integra potencia a la red a través de inversores de estado sólido [23]-[28], ya sea a gran escala o en la microgeneración (pequeños sistemas que generalmente son instalados en las azoteas de casas y edificios). Esta tendencia surge debido a que el inversor introducirá armónicos si no se controla en forma adecuada [29].

Los equipos de la empresa de suministro y de los clientes que están conectados a la red, están diseñados para operar con voltajes y corrientes de 50 y/o 60 Hz. La presencia de parámetros

de corriente y voltaje distorsionados puede causar efectos negativos en las cargas, como mal funcionamiento, disminución de la vida útil o daños en las mismas [30]-[32].

Las compañías suministradoras del servicio eléctrico requieren de los fabricantes y usuarios de estos equipos (inversores), el cumplimiento de las normas y disposiciones aplicables, [33]-[37], que garanticen que la instalación y operación del inversor y del sistema FV en su conjunto, sean seguras y no afecten adversamente la CEE.

En otro contexto, la apertura de los mercados eléctricos a nivel mundial y el incremento de la generación distribuida, mediante la integración de fuentes de energía renovables no convencionales (eólica y/o FV) en las redes eléctricas, han originado que la generación, transmisión y distribución de energía, se esté llevando a cabo por diferentes participantes que integran este mercado [38]. Las agencias encargadas de mantener las condiciones adecuadas de operación de los sistemas eléctricos, emiten regulaciones (códigos de red), que establecen requisitos mínimos de operación para dichos sistemas en cada país [39], [40]. Entre los requisitos técnicos establecidos en estos documentos se encuentran los relacionados con la CEE, enfatizando en el contenido de distorsión por armónicos de tensión y corriente, que tanto proveedores como usuarios deben cumplir; por lo que es de gran importancia estudiar el comportamiento de estos parámetros para el correcto funcionamiento de las redes eléctricas [41].

Para comprender a fondo el comportamiento de la distorsión armónica en este tipo de sistemas, es fundamental caracterizar este fenómeno, con la finalidad de determinar aquellos atributos peculiares que presenta y que por tanto lo distingue claramente del resto de su clase. Por otro lado, el modelado proporcionará la representación abstracta, conceptual, gráfica o física del fenómeno, a fin de analizar, describir, explicar y simular su comportamiento. El modelo generado permitirá determinar un resultado final a partir de unos datos de entrada, mientras la predicción servirá para estimar su comportamiento futuro.

La temática abordada se considera de gran importancia debido al constante desarrollo de los sistemas de generación distribuida, sobre todo los basados en sistemas FV, los cuales han proliferado de manera importante en los últimos años a nivel mundial [42]. Con los resultados de esta investigación, se pretende dotar a los interesados en estudios similares con información relevante para desarrollar nuevas estrategias para el análisis y solución de las problemáticas relacionadas con integración de potencia proveniente de fuentes de energías alternas, en especial, la FV y la eólica.

C. Viabilidad y Alcance de la Investigación

Contando con el apoyo y compromiso conjunto de dos instituciones públicas de educación superior de alto nivel como los son la Universidad Autónoma de Baja California y el Instituto Tecnológico de Mexicali, es posible la planeación, desarrollo y conclusión este proyecto. La totalidad de los recursos materiales y los equipos requeridos (paneles solares, inversores, tableros eléctricos, sistemas de alambrado y conexión, analizadores de redes eléctricas; equipo de medición como amperímetros y voltímetros, osciloscopios, sistemas de cómputo y tarjetas de adquisición de datos, entre otros), estarán puestos, en todo momento, a disposición de la investigación; así como los espacios adecuados para desarrollar las diversas actividades (aulas, laboratorios y demás infraestructura). Especialista en los campos del DDE, procesamiento digital de señales, aprendizaje profundo y RNA, así como de las demás áreas del conocimiento, sumaran esfuerzos en las diversas tareas, con la finalidad de aportar los conocimientos adecuados para el enriquecimiento de este proyecto, por lo que, al disponer de los recursos necesarios tanto humanos como materiales, la viabilidad de la investigación está garantizada.

Los alcances de este proyecto estarán limitados por las características de los dispositivos y equipos de generación FV disponibles, así como las peculiaridades de la red de suministro eléctrico a utilizar, es decir, la caracterización, el modelado y la predicción del comportamiento de la distorsión armónica, serán llevados a cabo utilizando un sistema de microgeneración FV con una capacidad de 1,500 Wp; potencia que será integrada mediante un inversor central de 3,000 W, a una red de suministro local en BT (220/127 V).

Por otro lado, la utilización de equipo de baja potencia eléctrica (voltaje y corriente), así como la conformación de un banco de pruebas debidamente diseñado y protegido, proporcionan las condiciones adecuadas para la realización de este proyecto; sumado a la amplia experiencia de los involucrados (investigadores y estudiantes), en el manejo de los equipos y actividades donde existe un contacto directo con la electricidad, condiciones que derivan en una baja probabilidad de perturbaciones y riesgos para la red eléctrica y para el personal involucrado en los trabajos de investigación.

D. Evaluación de las Deficiencias en el Conocimiento del Problema

En la literatura existen investigaciones en las cuales abordan temáticas sobre el análisis armónico en redes con integración FV, como las realizadas por Natthanon Phannil et. al. [43], en donde se estudiaron las características de los armónicos en la red, en el sistema FV y en la carga. Utilizando un simulador FV para generar energía solar, que luego fue integrada por un inversor, se transformó la CD en CA para alimentar a las cargas eléctricas conectadas a la red de distribución (alumbrado incandescente, fluorescente, incandescentes y fluorescentes combinados, alumbrado LED y una carga de fuerza, en este caso un motor). Los resultados finales de la investigación demostraron que la mayoría de los armónicos de la red se vieron afectados por el sistema FV y la carga, cuando el inversor alcanza casi la potencia nominal.

En el análisis del estado del arte, se pueden encontrar varias investigaciones similares a la anteriormente descrita, enfocadas todas, a la descripción del fenómeno armónico, así como también aquellas que describen el proceso de caracterización, modelado y supresión de dicho fenómeno; pero pocas de estas investigaciones contemplan una metodología de análisis completa, considerando desde la etapa del diseño y construcción de un banco de pruebas, un DDE que de robustez estadística a la investigación basado en el ANDEVA y diseños factoriales completos, así como métodos de comparación de medias para identificar las condiciones con mayor generación de armónicas de corriente, la adquisición de la información necesaria y adecuada de las variables bajo estudio, caracterizando su comportamiento mediante diversas herramientas matemáticas y estadísticas, así como el modelado y predicción mediante el uso de aprendizaje profundo. El propósito de este estudio es conformar una metodología integral para el análisis total del fenómeno armónico, caracterizando y proporcionando un modelo mediante RNA, que describa y prediga la influencia de dicho fenómeno, dentro de las redes eléctricas con integración de potencia FV; este último aspecto ha sido poco documentado en los trabajos relacionados con este tema.

III. ESTADO DEL ARTE

A. Análisis Armónico en Redes con Integración de Energía Fotovoltaica

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 [44]. Llevando a cabo mediciones en sistemas reales, algunos estudios han pretendido parametrizar y utilizar los resultados de las lecturas para realizar un posterior análisis de la distorsión armónica que se genera por el uso de inversores electrónicos de potencia. En otras investigaciones, se intentó caracterizar el comportamiento del fenómeno armónico mediante simulaciones y el uso de herramientas estadísticas y matemáticas, así como generar modelos y predicciones basados en RNA mediante el uso de algoritmos computacionales.

1) Mediciones en Tiempo Real

En los trabajos de C. Li [45], se informó de los problemas de CEE, específicamente de armónicas e interarmónicas en tres plantas FV reales conectadas a la red. Una primera planta FV de menos de 500 kW, con 30 inversores conectados en paralelo en el bus de 600 V fue analizada, donde no se suministraba carga local. En los resultados de las mediciones se encontró que la magnitud de la séptima corriente armónica se aproximaba al 20% de la corriente fundamental, resultando en distorsión de la forma de onda de la corriente. En la segunda granja solar de 28 kW a 600 V con 50 inversores en paralelo, se presentaron salidas del sistema FV bajo oscilaciones de 780 Hz. Al no encontrarse ningún cambio en las condiciones del servicio público, las interrupciones o eventos de falla fueron relacionados con la distorsión armónica. El último ejemplo involucró oscilaciones subsíncronas en tres granjas solares de 10 MVA cada una, conectadas a la red. En ellas se registraron oscilaciones débilmente amortiguadas cerca de 20 Hz al energizar un capacitor de 30 MVar a 44 kV, en el bus de la subestación. El análisis indicó que la corriente de salida contenía un componente de 80 Hz con una magnitud cercana al 75% de la corriente fundamental.

Al término de la investigación, se concluyó que las causas de las inestabilidades implicaban interacciones entre los sistemas de control del inversor FV y las impedancias características de la

red. Además, las frecuencias de las inestabilidades presentaron variaciones a gran escala, por lo tanto, los filtros convencionales podrían no mitigar los problemas de manera efectiva, debiendo examinar las soluciones aplicadas a los sistemas de control del inversor.

El comportamiento de CEE, específicamente en lo referente a la distorsión armónica de 17 plantas de energía solar FV interconectadas en 12 subestaciones diferentes, 11 de distribución y 1 de subtransmisión (con capacidades que oscilan entre los 1.5 MW y los 12 MW), fue analizado en las investigaciones de S. Abhiram et al. [46], 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, tendían a tener un efecto positivo en el sistema eléctrico, reduciendo o manteniendo la Distorsión Armónica Total de voltaje (THDv, por sus siglas en inglés), ya que los armónicos de corriente generados por el sistema FV, eran consumidos por la carga del usuario. Mientras en los sistemas FV más grandes (9 y 12 MW), cuya generación era integrada a las redes de subtransmisión, tendieron a tener un impacto negativo, al aumentar la THDv. Esto se debió a que no existían cargas de clientes en los servicios públicos locales que pudieran consumir estos armónicos de corriente generados.

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, ajustando adecuadamente los parámetros operativos de los inversores, así como manteniendo la generación FV a los niveles adecuados para ser consumida por las cargas locales, esto con la finalidad de disminuir la Distorsión Armónica Total (THD).

En los estudios realizados por T. Taylor et al. [47], se analizaron las corrientes armónicas de bajo orden generadas por un sistema FV. El sistema FV que fue estudiado constó de una matriz de 12.1 kW, conectada a la red local a través de un inversor trifásico de 14 kVA sin transformador. Las mediciones de campo se tomaron bajo diferentes niveles de irradiación solar, así como bajo diversos valores de factor de potencia del inversor. Primeramente, se analizó la distorsión de voltaje de fondo en el sistema eléctrico (sin conexión de inversores), encontrando un THDv por debajo del 2% durante todo el período de seguimiento, y su contenido de armónicos estuvo dominado por la componente de 5to orden.

Al analizar la integración de potencia del sistema FV en la red de suministro, se encontró que la THD fue inversamente proporcional a la potencia generada, es decir, variaba con la

irradiación solar; pero también por otros factores tales como la topología del inversor, la frecuencia de conmutación, los armónicos de fondo en el voltaje de suministro, la impedancia del sistema de energía, la temperatura de funcionamiento de la matriz, los controles del inversor de la CA y el seguimiento de la potencia máxima, así como la colocación y tipo de filtro utilizado en el inversor.

Con respecto a la influencia que presentó el cambio en el valor del factor de potencia sobre el THD, se encontró que esta aumentaba cuando el factor de potencia disminuía por debajo de la unidad (factor de potencia inductivo).

Al operar el sistema FV en modo isla, se redujo el THDv del 2% al 0.8%, concluyendo que la mayor parte de las emisiones armónicas de los inversores FV, se debieron a la distorsión de la tensión de alimentación.

L. Monteiro et al. [48], analizaron la interacción entre tres inversores solares diferentes, acoplados a un pequeño sistema FV conectado a la red (ubicado al norte de Brasil), estudiándose la THDv y la Distorsión Armónica Total de corriente (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 con capacidades de 1.36, 1.68 y 1.2 kWp respectivamente, se encontró, a través de los datos operativos recopilados, que los pequeños inversores solares analizados producían niveles considerables de THDi cuando se sometían a niveles de potencia por debajo de su valor nominal, pero los THDv resultantes estuvieron dentro del rango aceptable de acuerdo con los estándares técnicos. Finalmente, otro punto importante analizado, fue el factor de potencia de la instalación, que cambiaba significativamente dependiendo de la capacidad de producción del sistema FV y del perfil de demanda de la instalación.

También en Brasil, R. Vieira et al. [49], analizaron 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 de dicho país. Para realizar la recolección de datos, se instaló un dispositivo analizador de redes eléctricas en la salida del inversor del sistema conectado a la red, ubicado en un laboratorio universitario.

Los resultados obtenidos mostraron que el comportamiento de los perfiles de THDv, tenían poca variación a lo largo del día, tendiendo a valores aproximadamente constantes. En cuanto a la distorsión armónica de corriente, se pudo observar que se generó un aumento en la distorsión actual

de corriente en los períodos del día en que se registró una disminución en la potencia activa, debido a la nubosidad de la ubicación estudiada.

Al final de este trabajo, se determinó que los impactos después de la inserción del inversor FV pueden considerarse pequeños; concluyendo que el rendimiento del inversor en relación con los criterios de CEE fue satisfactorio.

En la publicación de D.G. Infield et al. [19], se presentó un estudio sobre la CEE de múltiples inversores conectados a la red. Las mediciones fueron realizadas en equipos monofásicos individuales específicos, que generaban en la red de BT bajo un rango de condiciones operativas, y para grupos de convertidores similares conectados en el mismo punto.

Para un solo inversor, se determinó que el grado de THDi, como porcentaje de la corriente fundamental, variaba significativamente con la salida de potencia real del inversor. A carga parcial, los niveles de THDi fueron más altos debido principalmente a errores de resolución de medición; exhibiendo un THDi mayor cuando operaba con un factor de potencia inductivo. Mientras el comportamiento armónico de los 5 inversores conectados en paralelo [50], [51], indicó, que los armónicos medidos se combinaban, sin atenuación de los armónicos inferiores, principalmente debido a la muy baja impedancia de la red en estas frecuencias.

Las conclusiones establecieron que, para inversores idénticos, solo se producía una cancelación muy limitada de armónicos de orden inferior debido a sus fases similares. Los efectos de atenuación también fueron limitados, identificándose un pequeño grado de interacción inversorinversor no deseado, que se volvió más probable a medida que aumentaba el número de inversores interconectados.

Un análisis de la CEE mediante mediciones en campo de un sistema FV conectado a una red de distribución local, utilizando un analizador de redes eléctricas, fue presentado por M. Leite et al. [52]. Las mediciones se realizaron en un sistema solar de 3.38 kWp, con un inversor central de 3,000 W. Se midieron y analizaron los espectros armónicos de voltaje y corriente en el punto de conexión del sistema FV, así como el espectro de corriente armónica de la instalación antes y después de su inserción. El objetivo principal del trabajo fue evaluar si las THD e individuales, estaban por debajo de los valores estipulados por los estándares de referencia.

En vista de los aspectos relacionados con CEE, y más específicamente los armónicos observados en este estudio, se concluyó que los valores encontrados en las mediciones cumplían con los estándares vigentes en la gran mayoría de los rangos de potencia generados. Determinando

que, debido al crecimiento exponencial de la inserción de sistemas FV, el hecho de que los inversores cumplan con los estándares actuales es de suma importancia, y refleja la tranquilidad y asertividad del mercado, brindando confianza a los operadores de los sistemas eléctricos.

En más investigaciones de esta índole, como las realizadas en Egipto por N. Ahmed et al. [53], en donde una gran cantidad de generadores FV han sido instalados y conectados a las redes de distribución a través de inversores, causando problemas de armónicos; los investigadores presentaron varias mediciones de voltaje, corriente, factor de potencia, THDi y THDv (bajo diferentes condiciones de operación), obtenidas de la planta FV, y las compararon con los índices y estándares de CEE aplicables. Los sistemas FV que fueron monitoreados fueron de 22.9 y 17.1 kWp respectivamente, conformados por el mismo tipo de paneles solares; el primer sistema operando en modo autoconsumo, mientras el segundo operaba interconectado a la red de suministro público.

Como resultado de las mediciones, se pudo determinar que la THDv y THDi en el sistema de autoconsumo estaban dentro de los estándares de comparación, excepto que algunos valores de THDi se presentaron fuera de los límites en el caso de cargas ligeras, mientras que, en el sistema interconectado a la red de suministro, la THDi resultó fuera de los límites, pero la THDv cumplió con el estándar.

Al concluir la investigación se determinó que usar generación FV como autoconsumo, puede contribuir a disminuir la potencia activa de las cargas en un 15-20%. Además, se observó que el aumento de la temperatura provocaba la disminución de la eficiencia FV, pudiendo ser atenuado dicho efecto en presencia de alta intensidad de irradiación.

El documento presentado por R. Langella et al. [54], mostró las pruebas exhaustivas y el posterior análisis detallado de los resultados de los rendimientos armónicos e interarmónicos de inversores FV, para un rango de diferentes condiciones de operación, aplicándose los procedimientos de medición y cálculo recomendados en las normas actuales para evaluar los contenidos armónicos e interarmónicos, así como los niveles de distorsión correspondientes [55]. Para ello, tres inversores FV diferentes (dos de 4.6 y uno de 10 kVA), fueron sometidos a pruebas y mediciones de laboratorio, en las cuales, sus salidas de potencia se variaron en rangos desde la potencia nominal hasta la potencia mínima posible, en la que pudieron mantener puntos de operación estables.

Las mediciones mostraron cambios significativos dependientes de la potencia de salida, en las emisiones armónicas e interarmónicas de los tres inversores probados, donde la presencia de distorsión de la forma de onda del voltaje de suministro y la impedancia de la fuente, tuvieron un fuerte impacto adicional en estos cambios.

Las conclusiones arrojaron que los inversores modernos exhiben una fuerte dependencia a la potencia de operación, indicada por un cambio en las emisiones armónicas e interarmónicas relativas y absolutas en los modos de operación de baja potencia, que pueden ser particularmente pronunciadas en los modos operativos de muy baja generación. Además, se identificó un impacto significativo de los efectos combinados de la impedancia de la fuente y las distorsiones de la tensión de alimentación, en el rendimiento armónico de los inversores.

El efecto de las fuentes de generación dispersa (en especial la generación con fuentes FV), en las redes de distribución eléctrica con respecto a la CEE en estas redes, fue tratado en los trabajos realizados por S. Seme et al. [56]. Para esta investigación, el análisis de la CEE se basó en mediciones reales de THD en cuatro sistemas FV existentes (dos de 45 kWp, uno de 49 kWp y uno más de 228 kWp), así como en dos estaciones transformadoras (cada una de 630 kVA). Las mediciones fueron realizadas en un periodo de 24 horas por 7 días consecutivos.

El análisis de las mediciones mostró que la inclusión de fuentes dispersas en una red de distribución eléctrica urbana, con una potencia de cortocircuito relativamente baja, podría comprometer la CEE según los estándares de la norma EN 50160 [16]; en el sentido de cumplir con los requisitos de distorsión armónica, particularmente en el caso de operación con baja potencia de salida, es decir, que la baja impedancia de cortocircuito estaba relacionada con caídas de voltaje mayores, causadas en los elementos de la red, e indirectamente en la impedancia de cortocircuito por componentes de corriente subarmónica y armónica alta. Estos últimos fenómenos fueron generados por los inversores de los sistemas FV, especialmente cuando funcionaban a baja potencia de salida. Esto es especialmente cierto, al existir la posibilidad de interacción de varios sistemas FV de funcionamiento independiente conectados al mismo bus.

Otra investigación de los parámetros de CEE, en especial con lo relacionado a la distorsión armónica generada por un sistema FV conectado a la red mediante un inversor electrónico, en diferentes modos de operación de factor de potencia y diferentes condiciones de carga, utilizando las mediciones experimentales, fue llevada a cabo por A. Elkholy [57].

Los estudios se realizaron en un inversor de 8 kWp. El sistema FV contaba con 24 módulos y un inversor de 8kW. Se usó un banco de pruebas que consistía en el analizador de CEE, un registrador solar y una computadora para adquirir todos los datos; realizándose las mediciones en condiciones reales 24 horas al día durante un mes.

Los resultados mostraron que los armónicos de corriente observados y rastreados a través de las mediciones fueron de 3ro, 5to, 7mo, 9no y 11vo orden. Durante la parte del día, los armónicos de corriente resultaron ser una proporción de la corriente fundamental, que también incluyó tiempos de variaciones repentinas para factores de potencia unitarios y de 0.95 en atraso. Por otro lado, durante el amanecer y el atardecer hubo una inyección significativa de corriente armónica, especialmente de 3ro y de 7mo orden en modo de compensación, al momento de arranque del inversor o solo al amanecer. El armónico de 3er orden prevaleció en amplitud, presentando un pico agudo en valores pequeños de la corriente fundamental, mientras que el 7mo armónico presentó un comportamiento bastante independiente con respecto a la corriente fundamental en el modo de compensación.

En las conclusiones se determinó que los resultados presentados podrían ser útiles para controlar, gestionar, predecir el comportamiento y simular el sistema FV, y finalmente, para el fabricante del inversor probado.

En el artículo de A. Vinayagam et al. [58], se presentaron los resultados de una investigación, que tuvo como objetivo revisar sistemáticamente las posibilidades de distorsión armónica en redes de baja potencia, basadas en generación FV en diferentes escenarios y los factores que influyen en el dominio del nivel de distorsión armónica en la red. Además, también se exhibió un estudio de caso que exploró la influencia de los armónicos en una instalación de microred en tiempo real, comparando los resultados con los estándares aplicables.

Para el análisis de armónicos en la microred fue utilizado un sistema FV conformado por paneles monocristalinos tipo N de alta eficiencias, en dos configuraciones diferentes, con una capacidad instalada total de alrededor de 50 kWp. La primera configuración entregaba una potencia aproximada de 15 kWp, mientras la segunda entregaba 35 kWp aproximadamente. Una carga constante con una capacidad de 64 kVA se mantuvo durante el análisis.

El estudio general mostró, que la THDv fue mínima para toda la relación de potencia FV, bajo diferentes condiciones solares, y se mantuvo dentro del límite permitido (inferior al 3%). Sin

embargo, los límites para THDi fueron sobrepasados con un 5.7% para una generación mínima de potencia del sistema FV.

Al término de la investigación, se concluyó que el nivel de THD en la red del sistema de energía variaba en diferentes escenarios, 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.

2) Caracterización Armónica Mediante Modelado y Simulación

Por otro lado, con estudios realizados mediante modelos y simulaciones computarizadas, se pretende analizar y comprender el comportamiento de los sistemas FV en referencia a la generación de armónicos, cuando la potencia eléctrica de dichos sistemas es integrada a las redes de suministro [59]-[65]. En un análisis realizado por I. Kouveliotis-Lysikatos et al. [66], se investigó a través de experimentos y simulaciones, los mecanismos que afectan la propagación de armónicos de voltaje debido a las corrientes distorsionadas en la red de suministro de BT. Se examinaron y probaron diferentes métodos para la simulación de las fuentes armónicas, y los compararon en términos de robustez, pero también de complejidad computacional.

Los trabajos se realizaron con el programa de cómputo PSCAD-EMTDC. En el contexto de un estudio armónico, se modelaron redes radiales de bajo voltaje (centrándose en redes rurales) con fuentes y cargas armónicas. Las fuentes armónicas correspondieron a inversores en una red de BT con alta penetración de sistemas FV. Las simulaciones fueron definidas por una variedad de escenarios con diferentes características (cargas de red y fuentes de armónicos), pero también diferentes topologías, con el objetivo de sacar conclusiones sobre el problema de los armónicos, así como para validar y comparar diferentes modelos de fuentes de armónicos.

Las simulaciones demostraron que diferentes modelos de fuentes armónicas proporcionan resultados muy diferentes, dependiendo de la implementación interna de la fuente armónica con parámetros inicialmente idénticos. Además, se demostró que un inversor FV totalmente modelado proporciona resultados muy realistas, pero aumenta significativamente la complejidad de la simulación en comparación con el modelo de fuentes armónicas rígidas, que, como se concluyó, no proporcionó una estimación aceptable.

Mientras tanto, A. Chidurala et al. [67], llevaron a cabo una investigación mediante simulaciones de tres estudios de caso, consistiendo en integraciones de sistemas FV en un solo nodo, con y sin la presencia de distorsiones de fondo en el suministro, y finalmente, penetración FV en múltiples nodos con distorsiones de suministro. Este estudio destacó las contribuciones armónicas de los sistemas FV en las redes de distribución reales y el impacto de la propagación de armónicos en los transformadores de potencia.

Para llevar a cabo la investigación, se utilizó la microred virtual IEEE 13 y el programa de cómputo PSCAD, con penetración del sistema FV en dos condiciones: modelando un inversor trifásico de fuente de corriente regulado por corriente, y un segundo inversor de fuente de voltaje controlado por corriente; conectando al circuito tanto cargas lineales como no lineales, esto con la finalidad de simular la distorsión de fondo del sistema en condiciones reales de operación. Debido a las operaciones dinámicas de las cargas, los armónicos generados a partir de las cargas no lineales se amplificaron o se suprimieron debido a la superposición armónica, pudiendo causar distorsión en la red de distribución.

Los resultados de la simulación mostraron que los armónicos generados por los sistemas FV son de naturaleza aditiva, y dependen de la concentración de armónicos de las cargas no lineales. Los resultados también confirmaron que tanto las distorsiones armónicas de corriente como de voltaje, aumentaban con respecto a la cantidad de sistemas FV conectados. Además, los niveles de armónicos de corriente, aumentaron significativamente en el transformador de distribución durante la salida de potencia FV nominal en la condición de carga completa.

Uno de los primeros estudios sobre el impacto armónico de una granja solar FV significativamente grande (20 MW), en un sistema de distribución de servicios públicos, fue presentado por R. Varma et al. [68]. Dicha red se modeló en detalle utilizando el programa de cómputo PSCAD / EMTDC de grado comercial, que se validó a través de estudios de flujo de carga realizados con el programa de cómputo CYME y correlacionados con las mediciones SCADA. El modelo de red validado se utilizó para el estudio de resonancia y el análisis de impacto de armónicos de las granjas solares, en diferentes condiciones de red.

Se realizaron estudios de armónicos para diferentes escenarios críticos, que podrían conducir a una alta distorsión armónica de los voltajes del bus. El primer escenario fue modelado para la red en resonancia debido a la 3ra armónica inyectada por el sistema FV y carga capacitiva conectada, un segundo escenario fue constituido por la inyección de armónicos altos durante un

día soleado, para el caso de operación base y carga capacitiva; los escenarios tercero y cuarto, estuvieron conformados por la inyección de armónicos altos durante un día nublado para el caso de operación base (también con carga capacitiva) y la inyección de alta armónica con red que no tiene resonancias (sin condensadores), respectivamente.

Como resultado de los estudios, se determinó que las resonancias de red eran causadas por los bancos de capacitores. Además, se estableció que las granjas FV suelen generar armónicos característicos. También se observó que se producía un THDv mayor durante los días nublados en comparación con los días soleados, debido a la mayor inyección de armónicos durante estos períodos. Por otro lado, la tendencia de los THDv obtenidos a través de simulaciones PSCAD / EMTDC, se correlacionó con la obtenida de las mediciones reales en las granjas solares, determinándose que los valores de THDv medidos directamente en las granjas, fueron más altos que los valores simulados para esos casos, debido a la distorsión armónica de fondo que no fue considerada en los estudios de simulación.

En el artículo publicado por R. Anurangi et al. [69], se discutió la generación y propagación de armónicos significativos de corriente y voltaje que son causados por inversores FV en redes de distribución. El impacto producido por las altas frecuencias de conmutación y los diferentes escenarios operativos, se estudiaron mediante el modelado detallado de los inversores FV en una red de distribución típica de BT, utilizando la plataforma de simulación PSCAD/EMTDC.

Para realizar esta investigación, fue modelada una red con integración FV que constaba de dos buses conectados a un nodo central de 400 volts y un transformador elevador de 160 kVA a 11,000 volts, con tres convertidores trifásicos y tres monofásicos conectados en el lado de BT en diversos puntos. La red fue evaluada bajo diferentes condiciones de operación, como el número y tipo de inversores en funcionamiento, así como diversas condiciones de irradiación solar y temperatura ambiente.

Al término de la investigación, se observó que la THDv aumentaba a medida que el punto de conexión del inversor se alejaba del transformador de distribución. La corriente eficaz que fluyó en una ubicación particular, gobernó la carga impuesta por un nivel armónico individual, donde los valores porcentuales de la THD estuvieron altamente influenciados por el componente fundamental del voltaje o corriente.

En los trabajos realizados por E. Kaufhold et al. [70], se presentó un modelo de estructura modular para estudios de BT en sistemas FV monofásicos. El objetivo principal de la investigación fue evaluar el comportamiento armónico de estos sistemas.

Además del análisis de estado estacionario, el modelo que fue presentado permitió también estudios dinámicos de inestabilidades armónicas. Para identificar y evaluar las posibles razones de tales inestabilidades en el lado del inversor, se proporcionó una fácil intercambiabilidad de los componentes del modelo en base a dicho concepto modular. Este modelo se pudo aplicar para simular diversas implementaciones de los sistemas FV, para simulaciones en el dominio del tiempo.

Se utilizó una metodología basada en la impedancia de la red y el método de huella digital, esto para evaluar los diferentes comportamientos de los sistemas FV con respecto a su topología y a la elección de parámetros. El modelo fue implementado en Matlab/Simulink y la biblioteca Simscape Power Systems.

En función de la evaluación basada en la impedancia, se pudo identificar los estados operativos críticos y la robustez de los inversores. Las formas de onda en el dominio del tiempo permitieron un mejor análisis de las posibles razones del comportamiento no lineal.

En las conclusiones de los estudios se estableció, que al variar los componentes individuales del sistema (por módulos), se pudo realizar una evaluación directa de su impacto. Junto a la evaluación de diferentes diseños, se logró establecer una comparación entre diversos conjuntos de parámetros para la misma topología de un componente individual.

Un modelo completo para el análisis en el dominio armónico de un sistema FV interactivo de red de convertidor de fuente de voltaje, fue presentado en el documento entregado por S. O. Nduka y B. Pal [71]. El modelo fue útil para evaluar el acoplamiento armónico entre el sistema FV y la red. Se incorporaron al modelo diferentes componentes del sistema, como el inversor, el filtro LCL y el transformador de interconexión. Usando este modelo, se cuantificaron las corrientes armónicas del sistema FV conectado a redes distorsionadas y no distorsionadas. El sistema de distribución estándar IEEE 13-bus se utilizó para la simulación, utilizando el entorno de Matlab.

Los resultados de la simulación mostraron una interacción perspicaz entre las corrientes armónicas del sistema FV producidas y las distorsiones de fondo de la red. Los hallazgos confirmaron que las excitaciones de resonancia (tanto en serie como en paralelo), son posibles debido a la interacción de la impedancia del sistema con el condensador del filtro FV.

En resumen, se determinó que existe una fuerte correlación entre el rendimiento armónico del sistema FV y la distorsión del voltaje de fondo de la red. Además, los componentes de carga pasiva conectados al PCC contribuyeron significativamente en la amortiguación de la resonancia, pudiendo surgir una interacción del condensador del filtro inversor con la impedancia de la red.

Z. Deng et al. [72], presentaron un estudio armónico basado en el modelado de diferentes sistemas FV conectados en paralelos a una red de distribución de bajo voltaje, con la finalidad de identificar la resonancia entre los inversores FV y la impedancia del sistema [73]-[76].

Con la ayuda del programa de cómputo DIgSILENT, los diversos sistemas FV fueron modelados y posteriormente se simuló su comportamiento con respecto al problema de la resonancia armónica causada por la alta penetración de estos sistemas, utilizando múltiples números y diferentes parámetros integrados en un sistema de bajo voltaje de un solo bus. Las ecuaciones de flujo de corriente se definieron para representar los efectos de acoplamiento de múltiples sistemas FV, y se explicaron los mecanismos de resonancia en paralelo y en serie.

Los resultados de la simulación mostraron que los diferentes sistemas FV producían picos de resonancia múltiple en el PCC. Estos picos podrían ser atenuados de manera eficiente mediante el uso de resistencias de amortiguación pasivas. Además, se estudió el fenómeno de la cancelación de las corrientes armónicas y se descubrió, que mediante el uso de una estrategia de control fuera de fase en el inversor, es posible suprimir la corriente inyectada en el PCC y atenuar la THDv.

3) Modelado y Predicción Mediante Redes Neuronales Artificiales

Las RNA han sido utilizadas tradicionalmente para la detección y clasificación de los problemas de CEE [77]-[79], así como en los sistemas que pretenden controlar y/o eliminar dichos fenómenos [80]-[91]. En investigaciones como las realizadas por A. Fattah et al. [92], se propuso una RNA de función de base radial para la identificación de la carga armónica [93]-[95]. Un microcontrolador de bajo costo fue utilizado para reunir datos con el método de la FFT [96][98]. La RNA se implementó con varios de los datos de entrenamiento y prueba, provenientes de la combinación de 15 tipos diferentes de carga, para validar la precisión y la eficiencia del algoritmo propuesto. Los resultados demostraron que el método implementado tiene una alta exactitud para determinar el tipo de cargas en función de su contenido armónico.

Debido a la necesidad de detección y clasificación de los diversos problemas de CEE, con el objetivo de aplicar una solución adecuada, A. Mejia et al. [99], propusieron una nueva metodología para la detección y clasificación de problemas de CEE utilizando un esquema basado en la unidad de medida fasorial, así como un método de clasificación mediante reglas basadas en umbrales y una RNA.

El objetivo de la propuesta fue separar los problemas de CEE que ocurren en la frecuencia fundamental (caídas, elevaciones o interrupciones), de aquellos que ocurren en frecuencias no fundamentales (transitorios oscilatorios, armónicos y muescas). El componente fundamental fue extraído utilizando el modelo de estimación fasorial proporcionado por IEEE C37.118.1. Por otro lado, la clasificación de transitorios oscilatorios, armónicos y muescas fue realizada por la RNA.

Como resultado final, el porcentaje de efectividad en la clasificación (en baja resolución), de fenómenos electromagnéticos asociados con la distorsión armónica fue del 91%, demostrando la efectividad y utilidad del método propuesto.

En el documento presentado por M. Andrejević et al. [100], las RNA fueron utilizadas para la identificación de cargas no lineales en la red eléctrica, como método para el monitoreo no intrusivo de la carga. Los parámetros específicos de un grupo de cargas no lineales fueron primeramente medidos, y luego se utilizó una RNA para identificar qué carga o grupo de cargas, estaban activadas en la red.

Mediante instrumentación virtual se midieron los parámetros de potencia activa, reactiva y de distorsión armónica para 13 combinaciones diferentes de dispositivos dentro de una oficina. La RNA de avance con una capa oculta fue entrenada para modelar una tabla de identificación del tipo de carga. Los valores de los parámetros eléctricos medidos en los diferentes equipos fueron las entradas a la red, y el código del tipo de carga fue la salida de la red.

Dado los resultados obtenidos, se pudo concluir que las RNA son medios convenientes y potentes para la caracterización de la carga, y lo que es importante, realizables como hardware.

Los investigadores D. Kurnia y H. Suryatmojo [101], presentaron en su artículo, un análisis de los efectos de la irradiación solar en un sistema FV con inversor monofásico conectado a un sistema de distribución trifásico de 4 hilos. El método propuesto tuvo como objetivo reducir la THDi en el sistema de distribución, debido a la irradiación intermitente y fluctuante. Para este propósito, se analizó un sistema FV con una capacidad de 3.5 kW, con conexión al lado de BT a través de un inversor, utilizando un controlador inteligente. Este controlador inteligente constó de

un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia, un controlador de RNA recurrente de diagonal constructiva, sincronización y transformación. El sistema de seguimiento del punto de máxima potencia variaba automáticamente la señal de referencia de voltaje para obtener voltaje de CD, extrayendo la potencia máxima de la cadena FV; mientras que el bloque de transformación se utilizó para convertir el voltaje y la corriente de salida del inversor de CA en el marco de referencia síncrono. Todas estas señales fueron procesadas por el controlador basado en la RNA para producir una modulación de ancho de pulso. Basado en los resultados de la simulación usando Matlab/Simulink, el THDi, se redujo de 5.09% a 4.63% en irradiación solar descendente y 5.43% se convirtió en 4.98% en condiciones de irradiación ascendente.

Una nueva estructura de RNA basada en la regresión de mínimos cuadrados, con gradiente descendiente para el control del sistema solar FV integrado en la red con una CEE mejorada, fue presentada por N. Kumar et al. [102], en ella, se utilizó un modelo de neurona de capa única para la extracción del componente fundamental de la corriente de carga. Durante la extracción de la componente fundamental, la estructura de la RNA atenuó los componentes armónicos, el ruido, las compensaciones de CD, el sesgo, las muescas y las distorsiones de la corriente no lineal; lo que mejoró la CEE en condiciones de red normales y anormales. Esta RNA constó de una arquitectura muy simple, que disminuyó la carga computacional y la complejidad del algoritmo, por lo tanto, fue fácil de implementar. El objetivo principal de la RNA fue proporcionar compensación de potencia reactiva, corrección del factor de potencia, filtrado de armónicos y mitigación de otros problemas de CEE. Además, cuando la irradiación solar fue cero, el condensador de enlace de CD y el convertidor de fuente de voltaje actuaron como un compensador estático de distribución, lo que mejoró el factor de utilización de la planta. El sistema propuesto fue modelado y sus rendimientos se verificaron experimentalmente en un prototipo desarrollado con diferentes perturbaciones de la red, así como en condiciones de variación de la insolación solar, cuyos rendimientos satisficieron el motivo de la técnica propuesta y el estándar IEEE-519 [34].

Debido a la preocupación con respecto al deterioro de la CEE generada por la creciente integración de las fuentes de energía solar FV en las redes de servicios públicos, principalmente en el escenario de una red de distribución débil, los investigadores P. Shukl y B. Singh [103], realizaron estudios sobre un control de RNA delta-bar-delta, para entregar de manera óptima el suministro de energía activa a las cargas y la energía restante a la red, en función de las capacidades del compensador estático de distribución, así como la mitigación de armónicos, el equilibrio de la

carga y el mejoramiento el factor de potencia. El algoritmo de control proporcionó la capacidad de ajustar los pesos en la RNA de forma adaptativa de manera independiente, y, por lo tanto, ofreció alivio en la complejidad del modelo predominante durante condiciones anormales de la red, junto con la reducción en el tiempo computacional. Además, la técnica de control basada en la RNA ofreció una precisión mejorada, debido a la estructura neural combinacional en el proceso de estimación. Se verificó el rendimiento del sistema según el estándar IEEE-519 [34]. Para validar el comportamiento del modelo propuesto, se realizó la simulación utilizando Matlab/Simulink, obteniéndose un desempeño satisfactorio para una amplia variedad de resultados en condiciones de estado estacionario y dinámicos, basados en validación experimental.

Motivados también por el aumento de las perturbaciones en la CEE debido al uso de equipos electrónicos, la necesidad de metodologías eficientes para la detección de dichas perturbaciones, así como proporcionar información relevante sobre su ocurrencia, M. Rodríguez et al. [104], implementaron un modelo basado en la transformada de Hilbert-Huang y una RNA perceptrón multicapa para la detección y clasificación eficiente, veloz y precisa de las perturbaciones de CEE de comportamiento no estacionario y no lineal [105]. Ocho de las perturbaciones más comunes se analizaron en función de los parámetros declarados en el estándar IEEE 1159 [106]. Por medio de las frecuencias instantáneas y funciones de modo intrínseco de cada perturbación, la RNA fue entrenada para la clasificación de estos disturbios. El método implementado alcanzó una precisión del de 94.6%, lo que demuestra la versatilidad y gran potencial que proporciona este método al detectar perturbaciones de CEE.

Cuando el objetivo de la investigación radica en el modelado y predicción de sistemas dinámicos, las RNA recurrentes son utilizadas [77], [81]. L. Yang et al. [107], propusieron un novedoso método de detección de corriente armónica basado en las RNA adaptativas, para mejorar la CEE de la generación FV conectada a la red. En el algoritmo implementado, la frecuencia fundamental y los parámetros armónicos de amplitud-fase fueron introducidos a medida que los pesos eran ajustados. Los parámetros armónicos se estimaron mediante el teorema de medición adaptativa. Se pudo predecir el tiempo futuro de las corrientes armónicas de acuerdo con los datos actuales y los datos históricos anteriores, logrando la detección armónica en tiempo real y rápida. Las simulaciones se realizaron en las estaciones de energía FV en un área determinada. Para verificar el rendimiento del algoritmo de detección, las simulaciones fueron ejecutadas mediante el uso del programa de cómputo PSACD, logrando una alta precisión y gran velocidad.

En términos de trabajo futuro, se determinó que las aplicaciones de las RNA recurrentes podrían implementarse con un sistema en tiempo real. Además, se determinó que algunos armónicos de la estación FV podrían ser eliminados de manera más efectiva al proporcionar la información obtenida por la RNA a la entrada del filtro activo.

En el artículo publicado por A.Y. Hatata y M. Eladawy [108], se presentó un método para modelar y predecir los armónicos de corriente de carga inyectados en microredes de energía, mediante Redes Neuronales No Lineales Autorregresivas con Entradas Externas (NARX por sus siglas en inglés). La red NARX propuesta se utilizó para modelar la no linealidad de cargas eléctricas [109]-[111]. La red se capacitó utilizando datos obtenidos de mediciones de campo. El método propuesto demostró un buen rendimiento para la predicción de la distorsión armónica actual, justificando así la precisión y la fiabilidad; concluyendo que estas RNA son perfectas para simular los complicados sistemas no lineales, debido a sus dependencias a largo plazo y su eficiencia computacional, además, se determinó que las redes NARX tienen la posibilidad de ser utilizadas para la predicción armónica en línea.

Finalmente, C. Panoiu y L. Ghiormez [112], expusieron los resultados del modelado y la predicción de la THDi y el THDv para una carga de alta potencia no lineal. El modelado se realizó utilizando técnicas inteligentes basadas en RNA e inferencia difusa [113]-[117]. Para lograr esto, los datos se midieron en una carga eléctrica no lineal, en este caso, un horno de arco eléctrico de alta potencia. Los resultados del modelado y predicción fueron considerados útiles para el diseño de filtros de corriente armónica, concluyendo que la presencia de este fenómeno disminuye la productividad y afecta la CEE.

IV. MARCO TEÓRICO

A. El Concepto de Calidad de la Energía Eléctrica

Cuando hablamos de CEE, es de suma importancia definir adecuadamente a que se refiere dicha terminología. Primeramente, la “energía eléctrica” es entendida como la capacidad que tiene un flujo de electrones impulsados por una diferencia de potencial para realizar un trabajo durante un tiempo determinado. Por otro lado, el término “calidad” describe al conjunto de propiedades y características de un producto o servicio que le confieren capacidad de satisfacer necesidades, gustos y preferencias, además de cumplir con las expectativas del consumidor. Esto nos lleva a definir por CEE al conjunto de propiedades y características del suministro eléctrico que satisfacen las necesidades del usuario. En sí, la CEE en términos generales, es un grupo de características inherentes tanto al servicio como a la señal de tensión o corriente eléctrica, que permiten apreciarla como igual, mejor o peor que otras; por tanto, podemos afirmar que la CEE en su concepto más amplio, considera tanto la continuidad del servicio como los atributos de las señales de tensión y corriente eléctrica, en un tiempo dado y en un espacio determinado de un sistema de potencia eléctrica.

Lo anteriormente descrito puede ser suficiente para definir a la CEE, pero la descripción no es única, y varía dependiendo del marco de referencia desde donde se analiza dicho concepto, lo que da lugar a diversas interpretaciones. Sankaran [118], define como CEE, al conjunto de límites eléctricos que permite que un equipo funcione de forma adecuada, sin pérdida del rendimiento o reducción de su tiempo de vida útil.

La norma IEC 61000-2-2/4 [119] y la norma CENELEC 50160 [16], definen la CEE como una característica física del suministro de electricidad, la cual debe llegar al cliente en condiciones normales, sin producir perturbaciones ni interrupciones en los procesos del mismo.

En el estándar de la IEEE 1100 [120], la CEE se delimita como el concepto de alimentar y poner a tierra equipos electrónicos sensibles, de una manera adecuada para la operación de dicho equipo; siendo compatible con el sistema de alimentación de la instalación y con otros equipos conectados a este mismo sistema. Con respecto a la definición anterior, Sankaran expone su desacuerdo [118], argumentando la limitación del concepto a equipos electrónicos sensibles, que deja fuera a los demás equipos eléctricos como motores, transformadores, generadores, computadoras, equipo de comunicaciones o cualquier artefacto eléctrico de uso industrial, comercial o doméstico, cuyo funcionamiento también puede verse afectado por la calidad del

suministro eléctrico. Por otro lado, en el estándar IEEE 1159 [106], se define la CEE como una gran variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica; por lo que dicha definición generaliza el concepto de CEE independientemente del tipo de carga.

La norma IEC 61000-4-30 [121], detalla como CEE, a las características de la electricidad en un punto dado de una red de energía eléctrica, evaluadas con relación a un conjunto de parámetros técnicos de referencia. Mientras M. Sánchez [122], relaciona este mismo concepto con un suministro de alta calidad, entendiéndose lo anterior como un abastecimiento continuo y libre de fluctuaciones para alimentar cargas, logrando con esto que los equipos sensibles de los usuarios sean alimentados mediante una entrega adecuada de energía eléctrica; determinando que la CEE no es más que un conjunto de características de la electricidad que es suministrada por un sistema de potencia, que permiten satisfacer las necesidades eléctricas requeridas.

Mientras tanto, J. Douglas [123], define la CEE como cualquier problema de potencia manifestado en la desviación de los valores ideales de la tensión, de la corriente o de la frecuencia, que ocasione falla o mala operación del equipo de un usuario. Mientras Dungan et al. [124], exponen diversos criterios para explicar la CEE desde diferentes escenarios, definiéndola desde la métrica de confiabilidad del servicio eléctrico (parámetro generalmente establecido por las agencias reguladoras de energía), o como las características de la fuente de alimentación que permiten que el equipo eléctrico de un usuario funcione correctamente. En este mismo contexto, E. Harper [125], afirma que el concepto de CEE es algo indeterminado, definiéndola desde su percepción como una ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicas en la red y variaciones de voltaje eficaz suministrado al usuario. Como puede entenderse, este criterio va más allá de una simple definición, ya que en allá se mencionan problemas específicos en ciertos parámetros eléctricos, en forma similar a lo que J. Douglas también manifiesta [123]. Mientras tanto, S. Barcon et al. [126], expresan la dificultad en el entendimiento del concepto debido a los diferentes puntos de vista de las personas que lo analizan y estudian. Argumentando, que mientras los usuarios lo asocian con la confiabilidad, los fabricantes de equipo eléctrico tienen puestas sus directrices en las características adecuadas del suministro que permitan la operación apropiada de las cargas. Para este autor, la mejor interpretación que define a un problema de CEE es cualquier evento o suceso posible, que se manifieste como una afectación del voltaje, la corriente o la frecuencia, que resulte en la falla o en la operación incorrecta

del equipo del usuario; haciendo hincapié específicamente al voltaje como el parámetro en donde se manifiesta la calidad del suministro eléctrico, debido a que la mayoría de las veces, el parámetro controlado es la tensión.

Existen una serie de problemas en el suministro eléctrico y en el uso del mismo, que determinan la ausencia de calidad en este, entre ellos se encuentran los relacionados con la magnitud del parámetro descrito (magnitud de voltaje, corriente, frecuencia, espectro, etc.) y, por otro lado, existen los problemas referenciados a la forma de onda [127]-[131]. En la literatura podemos encontrar amplia información sobre las características que definen a cada uno de los problemas de CEE, así como las causas que los generan. En la Tabla I se describen los parámetros que caracterizan a los problemas de CEE según el estándar IEEE 1159 [106].

B. Antecedentes de la Calidad de la Energía Eléctrica

Esencialmente, los problemas de CEE tienen sus orígenes tanto en la generación, distribución y suministro eléctrico, es decir, las compañías suministradoras del servicio de energía eléctrica cargan con parte de la responsabilidad, más, sin embargo, cierto tipo de cargas de los usuarios son consideradas como contaminantes para los sistemas eléctricos; entre ellas se encuentran dispositivos electrónicos, circuitos magnéticos y grandes cargas intermitentes, entre otras [132].

Al término de la guerra de los sistemas eléctricos (CD vs CA), y con la victoria de la CA sobre la CD, se propició la masificación del uso de la energía eléctrica. Fue a mediados de la segunda revolución industrial (1850-1914) cuando la utilización de la CA permitió la transmisión y distribución de grandes cantidades de potencia eléctrica a grandes distancias.

La aparición del primer transformador patentado reafirmó el uso masivo de la CA, ya que se logró transformar los parámetros de la potencia a valores adecuados y seguros para los usuarios. Al finalizar el siglo XIX, los sistemas eléctricos para alumbrado público alimentaban a dichas cargas con una frecuencia de 25 Hz, lo que provocaba un efecto conocido como "Flicker", que consiste en que el ojo humano puede detectar variaciones rápidas de la iluminación [133]. Para reducir este efecto, en los Estados Unidos de América se cambió la frecuencia de la CA de 25 Hz a 60 Hz, y se dictaminó como norma para todos los sistemas de generación americanos, estableciendo uno de los primeros antecedentes de problemas en la CEE a nivel de los consumidores [134].

Tabla I. Problemas de CEE y sus características, IEEE 1159 [47].

Categoría	Contenido típico espectral	Duración típica	Magnitud típica de voltaje
1.0 Transitorios			
1.1 Impulsivos			
1.1.1 Nanosegundos	5ns de elevación	< 50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1µs de elevación	50 ns-1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Baja frecuencia	< 5 kHz	0.3-50 ms	0-4 pu
1.2.2 Media frecuencia	5-500 kHz	20 µs	0-8 pu
1.2.3 Alta frecuencia	0.5-5 MHz	5 µs	0-4 pu
2.0 Variaciones de corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Sag		0.5-30 ciclos	0.1-0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5-30 ciclos	1.1-1.8 pu
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupción		0.5 ciclos-3 s	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 ciclos-3 s	0.1-0.9 pu
2.2.3 Swell		30 ciclos-3 s	1.1-1.4 pu
2.3 Temporales			
2.3.1 Interrupción		3 s-1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		3 s-1 min	0.1-0.9 pu
2.3.3 Swell		3 s-1 min	1.1-1.2 pu
3.0 Variaciones de larga duración			
3.1 Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 pu
3.2 Bajo voltaje		> 1 min	0.8-0.9 pu
3.3 Sobrevoltaje		> 1 min	1.1-1.2 pu
4.0 Desbalance de voltaje		Estado estable	0.5-2%
5.0 Distorsión de forma de onda			
5.1 Componente de CD		Estado estable	0-0.1%u
5.2 Contenido armónico	0-100th H	Estado estable	0-20%
5.3 Interarmónicas	0-6 kHz	Estado estable	0-2%
5.4 Muecas en el voltaje		Estado estable	
5.5 Ruido	Banda ancha	Estado estable	0-1%
6.0 Fluctuaciones de voltaje	< 25 Hz	Intermitente	0.1-7%
7.0 Variaciones en la frecuencia		< 10 s	

Entre los años 1940 y 1960, el desarrollo de la electrónica incrementó el uso de múltiples equipos como radios, televisores, teléfonos, así como la aparición de las primeras computadoras. Estos dispositivos se conocen con el nombre de cargas sensibles, debido a que para su buen funcionamiento requieren de una alimentación de potencia adecuada y precisa. Al mismo tiempo, dichas cargas generan deformación de las ondas de voltaje y corriente, afectando la CEE; por lo que también son consideradas como contaminantes de los sistemas eléctricos [135].

En pleno auge de la tercera revolución industrial, tanto las empresas suministradoras de energía eléctrica como los usuarios finales, han estado pendientes cada vez más de los problemas de la CEE. Si bien, el sector de la industria condujo a la necesidad de que los productos se volvieran económicamente más competitivos, reduciendo el tamaño de los equipos y maquinas eléctricas, haciéndolos más eficientes y diseñándolos con menores márgenes y tolerancias frente a los parámetros de la potencia suministrada para su correcto funcionamiento, los problemas de CEE también se han agravado debido a la combinación de factores como una mayor utilización de equipo para procesamiento de datos y comunicaciones, procesos industriales y de manufactura más complejos, altamente controlados por dispositivos electrónicos, así como un incremento en el número de disturbios eléctricos, pues la demanda a nivel mundial ha crecido más que la generación, repercutiendo esto en la calidad del servicio [136].

Históricamente, la CEE no había sido un problema mayor hasta la década de los años 80 del siglo XX [137]. En forma genérica, se consideraba que, excepto por la continuidad, el suministro para la mayoría de los usuarios era completamente satisfactorio, sin embargo, se produjeron cambios fundamentales en la naturaleza de la carga del consumidor y del sistema de potencia, que conciernen a la CEE; entre estos cambios se encuentra el desarrollo de la microelectrónica, el crecimiento incesante de la electrónica de potencia y el uso de capacitores para la corrección del factor de potencia.

C. Importancia de la Calidad de la Energía Eléctrica

Los problemas de CEE han existido desde el justo momento que se inicia el uso de la electricidad, pero en el pasado, debido a la robustez y linealidad de las cargas conectadas a las redes de suministro (que básicamente consistían en resistores, capacitores e inductores), los usuarios del

servicio y las compañías suministradoras solo estaban interesadas en la continuidad del suministro, sin tomar en cuenta otros parámetros de calidad.

El sistema de energía eléctrica se ha contaminado debido a un aumento de los dispositivos electrónicos en cargas residenciales, comerciales, equipos industriales y de generación. El aumento sustancial de las cargas no lineales, como convertidores, fuentes de alimentación conmutadas, hornos de arco, iluminación de descarga con balastos magnéticos y electrónicos, variadores de velocidad, computadoras, máquinas de fax y equipos electrónicos domésticos, juegan un papel importante en la distorsión de la forma de onda sinusoidal de los voltajes y corrientes de suministro.

La principal preocupación de los consumidores de electricidad es obtener un suministro de energía ininterrumpido con una CEE mejorada [138]. Para las empresas de servicios eléctricos existen varias cargas sensibles en hospitales y plantas de procesamiento que requieren una alimentación de energía eléctrica no contaminada e ininterrumpida. Por lo tanto, garantizar un suministro de calidad a todos los consumidores, incluso cuando algunas de las cargas son contaminantes, se convierte en un gran desafío.

Actualmente, el estudio de CEE ha adquirido una gran importancia; algunos autores atribuyen a la búsqueda del aumento de productividad y competitividad de las empresas como la razón más importante de dicha consideración, debido a la relación existente entre la CEE, la eficiencia y la productividad [139].

En este mismo contexto, y debido a que los problemas de CEE son mayormente imperceptibles hasta que se suscitan daños graves en equipos delicados y pérdida de información, lo que se traduce en tiempos muertos; el impacto negativo en la productividad de la empresa, en los costos de operación, mantenimiento, y primordialmente en una pérdida de confianza y lealtad de los clientes, hace que se torne significativo el considerar dicha problemática [140].

Con lo anteriormente descrito, se pone de manifiesto que el interés por el estudio, análisis y corrección de los problemas de la CEE, tiene un gran trasfondo económico; ya sea si hablamos del rendimiento, competitividad, eficiencia, operación, mantenimiento y otros factores, la CEE y/o la falta de ella (del lado del usuario o del suministrador), irremediablemente conducirá a un detrimento económico [21].

D. El Costo de la Calidad de la Energía Eléctrica

Los costos que experimentan los usuarios ante los problemas de calidad en el servicio de energía eléctrica, varían de un consumidor a otro en función de una serie de factores que incluyen la dependencia de la electricidad, la naturaleza y el momento de la perturbación del suministro eléctrico, así como el valor económico de la actividad interrumpida [135], [141].

Este valor ha sido estimado por diversos organismos e investigadores. Dicho cálculo es altamente variable debido a la falta de una metodología clara y aceptable. El costo puede ser el de las interrupciones y pérdidas industriales, o el importe del equipo para mantener las características adecuadas del servicio eléctrico [142].

En el estudio presentado por D. Lineweber et al [143], se informan los resultados de una encuesta realizada a 985 empresas en Estados Unidos de América, en la cual se afirma que, para disturbios que no sean sags, el costo económico por año en empresas del ramo digital e industrial fue alrededor de \$ 6.7 mil millones de dólares. En general, el estudio establece que, en todos los sectores empresariales, la economía de dicho país está perdiendo entre \$ 104 mil millones y \$ 164 mil millones de dólares al año, debido a interrupciones y otros \$ 15 mil millones a \$ 24 mil millones de dólares en pérdidas atribuidas a otros fenómenos de CEE [144].

E. Los Nuevos Retos de la Calidad de la Energía Eléctrica

Las nuevas tecnologías aplicadas en los sistemas eléctricos generan en ellos cambios constantes, cambios que abarcan desde las etapas de generación, hasta las redes que distribuyen la energía a los usuarios en los diferentes niveles de tensión. El avance tecnológico y la necesidad de diversificar la matriz energética debido a temas económicos, ecológicos y el continuo crecimiento de la demanda eléctrica, ha llevado a la búsqueda de nuevas estructuras de generación, transporte y distribución.

Tradicionalmente la generación de energía se ha realizado mediante plantas centralizadas, es decir, grandes sistemas generadores ubicados normalmente en lugares distantes del punto de consumo y transportada al usuario final a través de líneas de alta tensión que recorren cientos de kilómetros de distancia (Fig. 1a), generando con esto, muchas pérdidas [145]. Actualmente, debido al creciente desarrollo de la tecnología electrónica y al uso cada vez más frecuente de las energías alternas, es posible que los usuarios puedan generar parte de la energía que consumen y en su caso, enviar a la red del suministrador algún excedente; logrando esto a través de la interconexión de la

planta generadora a la red eléctrica del suministrador. Con este tipo de plantas ha surgido el concepto de generación distribuida, el cual puede entenderse como aquella que consiste básicamente en la generación de energía eléctrica por medio de muchas pequeñas fuentes de energía (Fig. 1b), en lugares lo más próximos posibles a las cargas [146]. Los objetivos de este tipo de generación consisten en asegurar la sustentabilidad y sostenibilidad energética, reduciendo los efectos contaminantes y difundiendo el uso masivo de las energías renovables como medios alternativos para minimizar los efectos nocivos al medio ambiente.

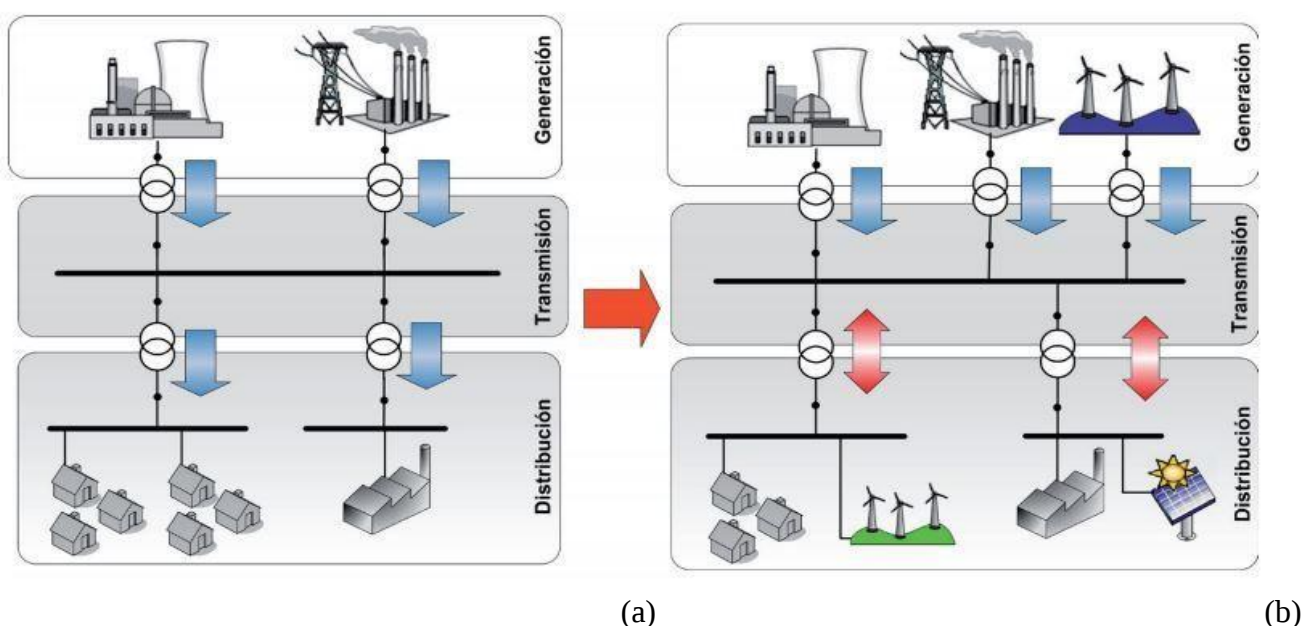


Fig. 1. Esquemas de generación eléctrica: (a) Generación centralizada. (b) Generación distribuida.

Tomado de: <https://icesismartgrid.wordpress.com/2014/04/20/smart-grid-generacion-distribuida-y-bidireccional/>

De las energías alternas de mayor uso en los sistemas de generación distribuida se encuentra la energía solar FV [147]. La energía solar FV es una fuente de energía limpia y renovable, que utiliza la radiación solar para producir electricidad. Se basa en el llamado efecto fotoeléctrico, por el cual determinados materiales son capaces de absorber fotones (partículas lumínicas) y liberar electrones, generando una corriente eléctrica. Para ello, se emplea un dispositivo semiconductor denominado celda o célula FV, que puede ser de silicio monocristalino, policristalino o amorfo, o bien, de otros materiales semiconductores de capa fina [148], [149].

Existen dos tipos de plantas FV, las que están conectadas a la red y las que no [150]. Las plantas con conexión a la red cuentan con paneles FV, los inversores electrónicos y los transformadores que elevan los voltajes generados por los paneles solares a las tensiones adecuadas para ser integradas a las redes de distribución y suministro. Las instalaciones no conectadas a la red operan en isla y suelen encontrarse en lugares remotos como campos agrícolas y ganaderos, para satisfacer demandas de iluminación, servir de apoyo a las telecomunicaciones y accionar los sistemas de riego. Estas plantas aisladas requieren de dos elementos adicionales para funcionar, las baterías encargadas de almacenar la energía producida por los paneles y no demandada en ese instante, y los reguladores de voltaje que protegen la batería contra sobrecargas y previenen un uso ineficiente de la misma [151].

Los parámetros de la potencia entregada por los sistemas FV son de forma de onda directa (voltaje directo y corriente directa -CD-), por lo que es necesario transformarlos en parámetros con forma de onda sinusoidal (alterna), con características de amplitud y frecuencia adecuadas para ser integradas a las redes eléctricas convencionales (en sistemas interconectados). Dicha transformación es llevada a cabo por los inversores, que son dispositivos electrónicos que permiten incorporar la potencia generada en el sistema FV a la red del suministrador, y que tienen como función elemental tomar la señal de CD de entrada con un V_i (voltaje de entrada), y convertirla a una señal de CA de salida con un V_o (voltaje de salida) y f_o (frecuencia de salida) [4]. Esta conversión debe ser llevada a cabo de tal forma que las características de la onda de salida del inversor se deben 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 [5], [7], [8].

Las estructuras internas de los inversores están conformadas por elementos de estado sólido como transistores controlados por osciladores (tecnología básica); mientras que los inversores más modernos utilizan dispositivos más avanzadas como los tiristores, los triac, IGBT y MOSFETS. La mayoría de estos componentes electrónicos tienen un comportamiento no lineal (su impedancia cambia con el voltaje aplicado) [152], [153].

Un inversor ideal produce una señal de onda sinusoidal de salida pura, sin embargo, los inversores reales producen corrientes con formas de ondas distorsionadas que se inyectan en los sistemas de potencia [69], [154]-[158]. Esta corriente distorsionada, al pasar por la impedancia de carga, produce caídas de voltajes también distorsionadas [29], [58], [159]. Debido a que los equipos

de las compañías de suministro y los de los usuarios están diseñados para operar con voltajes y corrientes a 50 y/o 60 Hz, y formas de onda sinusoidales bien definidas, la presencia de parámetros de potencia distorsionados puede causar efectos negativos en las cargas, como mal funcionamiento, disminución de la vida útil o daños en ellas [30]-[32].

F. La Distorsión Armónica

Las formas de onda distorsionadas de voltaje y de corriente generadas por los inversores de los sistemas FV, son debidas al contenido armónico en ellas. Los armónicos son tensiones o corrientes sinusoidales que tienen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia a la que el sistema de suministro está diseñado para operar (denominada frecuencia fundamental - generalmente 50 Hz o 60 Hz-). Combinadas con la tensión o corriente fundamental, los armónicos producen distorsión de la forma de onda. La distorsión armónica existe debido a las características no lineales de dispositivos y cargas en el sistema de energía, y es caracterizada por su contenido espectral, duración y magnitud (Fig. 2), [106].

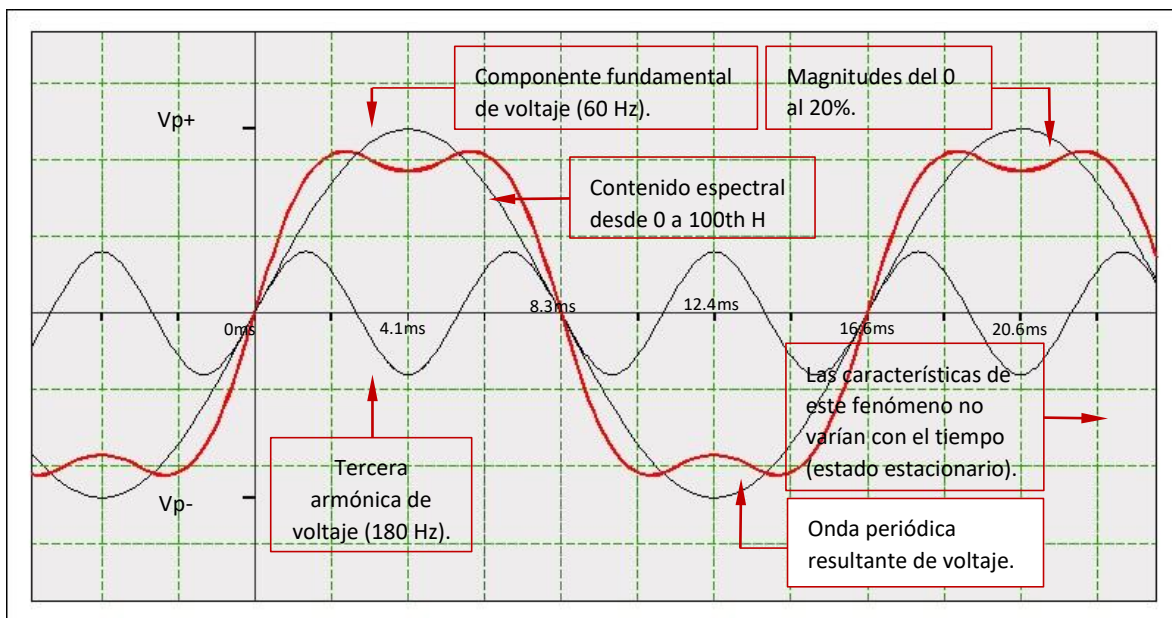


Fig. 2. Distorsión armónica de voltaje con sus parámetros característicos.

Las fuentes de alimentación conmutadas que se utilizan a menudo en equipos electrónicos, son importantes contribuyentes de armónicos en el sistema de potencia. Entre algunos otros

dispositivos y cargas que son considerados generadores de armónicos se encuentran los puentes de diodos y los convertidores de línea conmutada, así como otros dispositivos, como inversores modulados por ancho de pulso que son utilizados en la generación distribuida basada en fuentes renovables y en el accionamiento y control de máquinas rotativas [106].

G. Caracterización de la Distorsión Armónica

Existen varios índices que nos ayudan a determinar el grado de distorsión armónica en una señal ya sea voltaje o corriente; entre ellos se encuentran el Factor de Cresta (CF por sus siglas en inglés), el Valor Efectivo Total (RSS por sus siglas en inglés), la Distorsión Armónica Individual (IHDn por sus siglas en inglés) y la THD; este último es el índice más utilizado para medir el cambio de forma de onda de voltaje o corriente de su forma de onda sinusoidal convencional [57], [160].

El CF es igual al valor pico de la amplitud de la forma de onda dividido por el valor efectivo. El propósito de calcular el factor de cresta es darle al analista una idea rápida de cuánto impacto está ocurriendo en la forma de onda. El CF para señales de voltaje se define como:

$$CF_v = \frac{V_p}{V_{rms}} \quad (1)$$

donde V_p y V_{rms} son la amplitud del pico de voltaje de la forma de onda y el valor efectivo de la señal (rms), respectivamente.

El CF para señales de corriente se define como:

$$CF_i = \frac{I_p}{I_{rms}} \quad (2)$$

donde I_p e I_{rms} son la amplitud pico de corriente de la forma de onda y el valor efectivo de la señal, respectivamente.

La RSS se define como la cuantificación de los armónicos en función del valor total de la forma de onda efectiva, calculando la raíz cuadrada de la suma de los valores cuadrados efectivos de cada componente individual, sin tener en cuenta ningún componente directo de la señal.

El RSS para señales de voltaje se determina como:

$$V_{RSS} = \sqrt{\sum_{n=1}^{nmax} V_n^2} \quad (3)$$

donde V_n es el valor efectivo de la n ésima tensión armónica.

Mientras que el RSS para señales de corriente se define como:

$$I_{RSS} = \sqrt{\sum_{n=1}^{nmax} I_n^2} \quad (4)$$

donde I_n es el valor efectivo del n ésimo armónico de corriente.

La IHD $_n$ también se conoce como Factor Armónico (HF por sus siglas en inglés). Es la relación entre el valor efectivo del n ésimo armónico (V_n o I_n) y el valor efectivo del componente fundamental (V_1 o I_1).

La IHD $_n$ de voltaje se define como:

$$IHD_{Vn} = \frac{V_n}{V_1} \quad (5)$$

donde V_n es el valor efectivo de la n ésima tensión armónica y V_1 el valor efectivo de la componente fundamental respectivamente.

La IHD $_n$ de corriente se determina como:

$$IHD_{In} = \frac{I_n}{I_1} \quad (6)$$

donde I_n es el valor efectivo del n ésimo armónico de corriente e I_1 el valor efectivo del componente fundamental respectivamente.

La THD es un término que se utiliza para describir las desviaciones de una forma de onda no lineal de las características de una forma de onda sinusoidal ideal. La THD se calcula como la relación entre el valor efectivo del contenido armónico y el valor efectivo del componente fundamental, expresado como un porcentaje de la base [161].

La THD de voltaje se calcula como:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n>1}^{k_{max}} V_n^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (7)$$

donde V_n es el valor efectivo de la n -ésima tensión armónica y V_1 el valor efectivo de la componente fundamental respectivamente.

La THD de corriente es:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n>1}^{k_{max}} I_n^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (8)$$

donde I_n es el valor efectivo del n -ésimo armónico de corriente e I_1 el valor efectivo del componente fundamental respectivamente.

Para caracterizar las corrientes armónicas de una manera significativa, la norma IEEE 519 [34], define la Distorsión de la Demanda Total (TDD por sus siglas en inglés). Este término es el mismo que el THD excepto que la distorsión se expresa como un porcentaje de la corriente de carga actual seleccionada, como la demanda máxima, en lugar de un porcentaje de la magnitud de corriente fundamental rms.

La TDD se define como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n>1}^{k_{max}} I_n^2}}{I_L} \cdot 100\% \quad (9)$$

donde I_n es el valor efectivo del n -ésimo armónico de corriente e I_L es la corriente de demanda máxima en el nodo analizado.

Para una caracterización más detallada del fenómeno armónico, es necesario procesar la señal distorsionada. Enfoques tradicionales como lo son el “tiempo-frecuencia” o “tiempo-escala”, mediante el uso de herramientas matemáticas como son la DFT, la FFT, la STFT, la CWT y la Transformada de Hilbert-Huang, son utilizadas para el análisis de las señales [162], [163].

La DFT se delimita como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (10)$$

para $k = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1$

La DFT cambia una función en otra, obteniendo una representación en el dominio de la frecuencia; siendo la función original una función en el dominio del tiempo. Pero la DFT requiere que la función de entrada sea una secuencia discreta y de duración finita. Dichas secuencias se suelen generar a partir del muestreo de una función continua.

Por otro lado, el algoritmo de la FFT puede reducir el tiempo necesario para encontrar la DFT, eliminando una gran parte de los cálculos repetitivos y permitiendo una mayor precisión.

La STFT se define como:

$$STFT\{x(t)\} \equiv X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \omega(t-\tau) e^{-j\omega t} dt \quad (11)$$

donde $x(t)$ es la señal a analizar y $\omega(t-\tau)$ es la función ventana.

En la STFT se divide la señal en pequeños segmentos, y calcula la transformada de Fourier de cada segmento por separado, de esta forma se logra una representación tiempo-frecuencia de la señal, que permite conocer no sólo el valor de sus componentes en frecuencia, sino también su ubicación temporal; sin embargo, la información de localización tiempo-frecuencia sólo puede

obtenerse con una exactitud limitada, determinada por el ancho de la ventana temporal utilizada [164], [165].

La CWT se define de la siguiente manera:

$$CWT_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt; a, b \in \mathbb{R}; a \neq 0 \quad (12)$$

en donde $x(t)$ es la señal a analizar, ψ es la wavelet madre, mientras a y b son los parámetros de dilatación y traslación respectivamente [166].

En la CWT se compara a la señal de interés con una forma de onda particular, que en general posee soporte compacto (o decae suficientemente rápido). Trasladando y dilatando dicha onda se logra una representación que permite apreciar las variaciones temporales de las escalas presentes [167], [168].

La transformada de Hilbert-Huang es una herramienta para analizar señales no lineales y no estacionarias. Se ha validado empíricamente y ha demostrado ser muy efectiva para una gran variedad de señales de disciplinas muy distintas. El método para obtener esta transformada se compone de dos partes: la descomposición en modos empíricos de la señal (EMD por sus siglas en inglés) y el análisis de cada uno de los modos a través de la transformada de Hilbert (HSA por sus siglas en inglés). Cada uno de los modos empíricos debe contener un número de máximos y mínimos locales, así como de intersecciones con el cero, que no difieran en más de uno. Además, la media de las envolventes de los máximos y mínimos locales debe ser muy próxima a cero [169], [170]

Cada uno de los modos empíricos define un modo físico de la señal del sistema a estudiar, que, en consecuencia, puede analizarse independientemente a través de la transformada de Hilbert.

Si $c(t)$ es un modo empírico, su transformada de Hilbert $\hat{c}(t)$ que se define como:

$$\hat{c}(t_0) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c(t)}{t-t_0} dt \quad (13)$$

donde P denota el valor principal de Cauchy.

H. El Modelado de la Distorsión Armónica

El concepto de “modelo” en la ciencia se describe como una representación abstracta, conceptual, gráfica o física de los fenómenos, sistemas o procesos, a fin de analizar, describir, explicar o simular su comportamiento. Un modelo permite determinar un resultado final a partir de unos datos de entrada, y su clasificación es tan amplia como sus aplicaciones. En las ciencias exactas, los modelos se clasifican básicamente en dos grandes vertientes, los empíricos y los teóricos; de los que se derivan los modelos estocásticos y los modelos determinísticos. Los modelos estocásticos incluyen generadores de procesos aleatorios dentro del mismo que modifican ligeramente algunas de las variables, de esta manera, para un mismo conjunto de datos de entrada, las salidas no serían siempre iguales. Por el contrario, un modelo determinista es aquel en el que, dado un conjunto de parámetros y variables de entrada, va a producir siempre el mismo conjunto de variables de salida.

En la actualidad, los modelos computacionales están siendo utilizados con mayor frecuencia al momento de simular y estudiar el comportamiento de sistemas dinámicos complejos. Un modelo computacional contiene numerosas variables que caracterizan el sistema bajo estudio. La simulación se realiza ajustando cada una de estas variables, solas o combinadas, y observando cómo los cambios afectan los resultados. Las simulaciones de modelos ayudan a los investigadores a realizar predicciones acerca de qué pasará en el sistema real que se está estudiando en respuesta a condiciones cambiantes.

Dentro de los modelos computacionales, las redes RNA se definen como algoritmos informáticos que simulan la actividad de las neuronas y el procesamiento de información del cerebro humano [171]. Las RNA tienen la capacidad de aprender a realizar tareas basadas en un entrenamiento o experiencia inicial. Estos sistemas se preparan y se forman a sí mismos, en lugar de ser programados de forma explícita, y sobresalen en áreas donde la detección de soluciones o características son difíciles de expresar con la programación convencional; como son el procesamiento de imágenes y de voz, reconocimiento de patrones, planeamiento, interfaces adaptivas para sistemas hombre/máquina, control, optimización, filtrado de señales y predicción [172].

Existen cuatro elementos básicos en todo modelo de neurona artificial (Fig. 3):

1. Las conexiones denominadas pesos, que son las que determinan el comportamiento de la neurona. Estas conexiones pueden ser de excitadoras o inhibidoras, es decir, positivas o negativas.
2. Un bloque sumador, que se encarga de sumar las entradas de la neurona, multiplicadas por su respectivo peso.
3. Una función en principio no lineal, que elimina la linealidad de la red, haciendo que esta pueda funcionar con problemas no lineales, además de limitar la amplitud de la salida de la neurona; mientras tanto, las funciones lineales se usan si a la salida se requiere una regresión lineal y de esta manera a la red neuronal que se le aplica la función, va a generar un valor único, simplemente devolviendo el valor que se le ha pasado. En las funciones de activación se pueden modelar relaciones mucho más complicadas entre las entradas y los resultados predichos.
4. En algunos casos existe un umbral que determina cuando se activa la neurona.

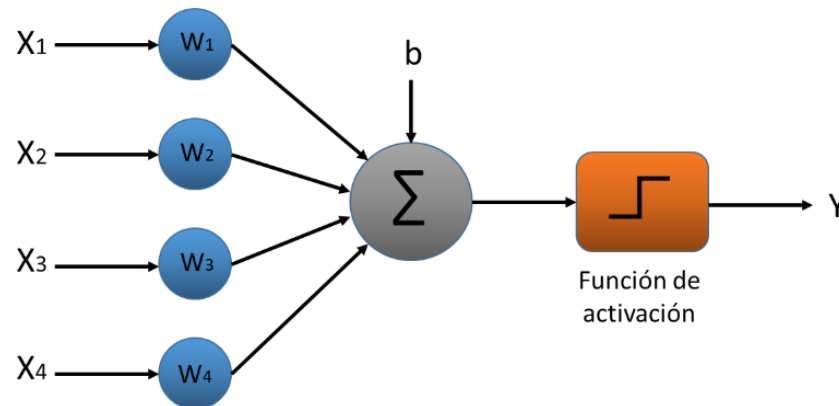


Fig. 3. Estructura básica de una RNA.

En el modelo matemático de una neurona artificial (Fig. 4), hay 3 funciones operacionales distintas. Primero, la entrada escalar X es multiplicada por un peso escalar W para formar un producto WX , de nuevo, un escalar. Segundo, la entrada ponderada se añade a un sesgo escalar b para formar la entrada neta n ; este sesgo puede ser visto como un ajuste del producto WX por una cantidad b . Finalmente, la entrada neta pasa a través de una función de transferencia f , la cual produce una salida escalar Y [173].

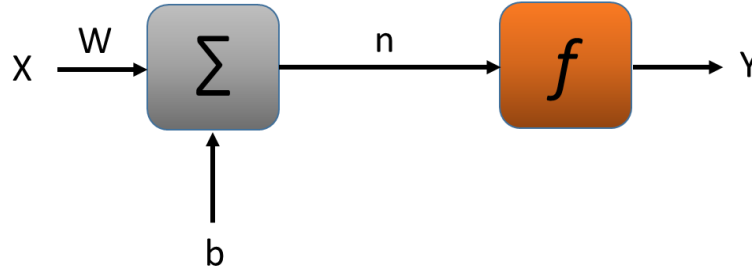


Fig. 4. Modelo matemático de una neurona artificial.

Según la información contenida en el párrafo anterior, el modelo matemático de una RNA se define bajo las siguientes ecuaciones:

$$Y=f(n) \quad (14)$$

$$Y=f(WX+b) \quad (15)$$

Como anteriormente se mencionó, el objetivo de la RNA es resolver los problemas de la misma manera que el cerebro humano, y su clasificación basada en la topología considera a las RNA monocapas, multicapas, convolucionales, recurrentes y de base radial, entre otras.

I. Red Neuronal Artificial Recurrente

Las RNA recurrentes no tienen una estructura de capas, sino que permiten conexiones arbitrarias entre las neuronas, incluso pudiendo crear ciclos; con esto se consigue crear la temporalidad, permitiendo que la red tenga memoria (Fig. 5).

Los datos introducidos en el momento “t” en la entrada, son transformados y van circulando por la red incluso en los instantes de tiempo siguientes $t + 1$, $t + 2$, ...

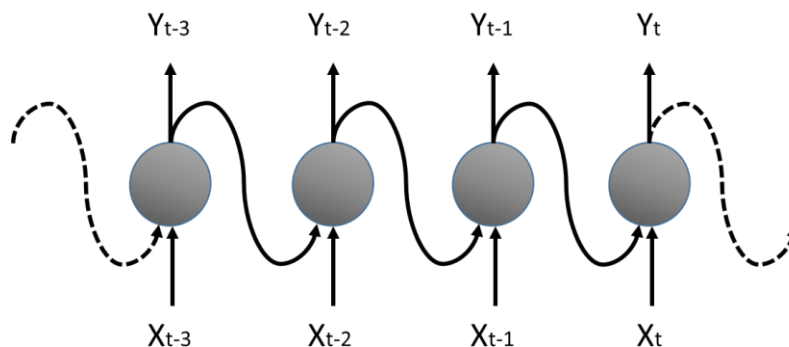


Fig. 5. RNA recurrente.

La arquitectura de RNA recurrente se ha convertido en un modelo de RNA implementado en diferentes dominios, debido a su capacidad natural para procesar entradas secuenciales y conocer sus dependencias a largo plazo [174]. A diferencia de la RNA convencional, las neuronas de una RNA recurrente están conectadas entre sí en la misma capa oculta y se aplica una función de entrenamiento a los estados ocultos repetidamente [174]. Las RNA recurrentes son modelos de aprendizaje profundo, que se alimentan a ellas mismas una cantidad “n” de veces, es decir, la neurona de salida vuelve a poner el resultado en la neurona de entrada una cantidad de “n” veces.

En este sentido, las redes NARX son extensiones de las RNA recurrentes, las cuales han logrado excelente rendimiento en diversas tareas, especialmente en problemas secuenciales, así como en el modelado de sistemas dinámicos y predicción de series temporales [175]-[177]. Las redes NARX están dentro de las redes dinámicas recurrentes con conexiones de retroalimentación que encierran varias capas de la red. La ecuación definitoria para el modelo de una red NARX es:

$$y(t)=f(y(t-1), y(t-2), y(t-ny), x(t-1), x(t-2), x(t-nx)) \quad (16)$$

donde el siguiente valor de la señal de salida dependiente $y(t)$, se calcula a partir de valores previos de la señal de salida y valores previos de la señal independiente de entrada (exógena).

Hay muchas aplicaciones para las redes NARX. Se pueden usar como predictores para pronosticar el siguiente valor de la señal de entrada; también se puede utilizarse para el filtrado no lineal, en el que la salida de destino es una versión libre de ruido de la señal de entrada. El uso de las redes NARX se muestra en otra aplicación importante, el modelado de sistemas dinámicos no lineales.

La salida de las redes NARX se puede considerar como estimación del sistema dinámico que se está intentando modelar, por ello, la salida se retroalimenta a la entrada de la red, siendo esta la estructura estándar de una red de este tipo (lazo cerrado), pero al disponerse de esta salida durante el propio entrenamiento, se puede crear otro tipo de estructura, la serie-paralelo o lazo abierto, donde se utiliza la salida real en vez de la estimada. Este tipo de configuración confiere al entrenamiento distintas ventajas, como son, que la entrada a la red será más precisa y que la orientación será hacia adelante, por lo que una propagación inversa estática puede ser utilizada.

En la imagen inferior (Fig. 6a), se observa una red NARX de lazo abierto, mientras que la Fig. 6b, representa el caso de una red NARX con lazo cerrado.

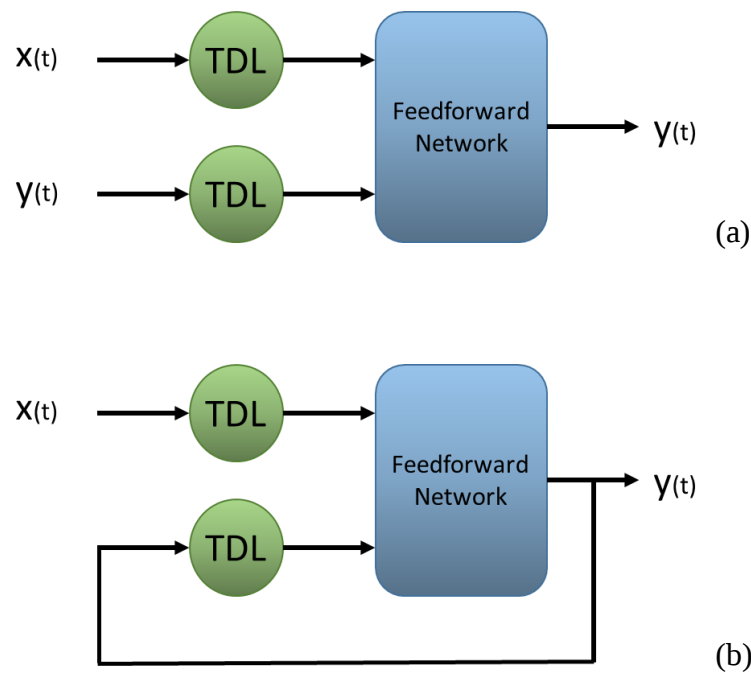


Fig. 6. Arquitectura de la red NARX: (a) Red de lazo abierto (serie-paralelo). (b) Red de lazo cerrado (paralelo).

El entrenamiento de las redes NARX es de tipo supervisado. Este entrenamiento consiste en otorgar a la red los patrones de entrada, así como la salida esperada (resultado correcto); de tal forma que, para cada conjunto de datos de entrenamiento que es suministrado a la red, la salida puede ser comparada con la solución correcta y los pesos de la red pueden ser cambiados de acuerdo

a la diferencia. El objetivo es que la red modifique los pesos, con el fin de que ésta pueda no sólo asociar las entradas con las salidas después del entrenamiento, sino que pueda también dar resultados plausibles para entradas similares pero desconocidas, es decir, que pueda generalizar.

V. METODOLOGÍA

Para dirigir este proyecto de manera adecuada y alcanzar los resultados deseados, fue necesario plantear las estrategias a ser utilizadas en el proceso, por lo que en el presente capítulo se explican los pasos que se llevaron a cabo para desarrollar esta investigación. Se describe el objeto de estudio, los equipos de medición y de adquisición de datos utilizados, las normas y regulaciones aplicadas, así como los procedimientos empleados en el desarrollo de los trabajos. Además, se proporciona información acerca de la recolección de los datos que fueron utilizados para el análisis armónico, y de los métodos estadísticos que sustentaron la robustez del proyecto.

Como anteriormente se ha mencionado, uno de los elementos principales en los sistemas de generación FV integrados a la red, es el inversor. El inversor se define como un dispositivo electrónico que tiene como función principal adecuar los parámetros de generación de potencia eléctrica FV [153], de tal manera que cuenten con las características necesarias para ser integrada a las redes de distribución convencionales [178], (entendiéndose como redes de distribución convencionales aquellas que distribuyen potencia generada por centrales eléctricas convencionales, es decir con generación centralizada). También se afirma que los inversores indudablemente introducirán armónicos de corriente si no se controla su operación en forma adecuada [29]. Es importante mencionar que la generación de corrientes armónicas por parte de estos equipos es un fenómeno inherente, esto debido a los dispositivos de estado sólido que los conforman. Las corrientes distorsionadas que fluyen hacia las redes de distribución y suministro, interactúan con la distorsión de fondo contenida en la red y con la impedancia del sistema [113].

En esta investigación, la caracterización, modelado y predicción del fenómeno armónico de corriente, se llevó a cabo sobre un alimentador de red de suministro eléctrico constituido por un circuito monofásico de 3 hilos, 220/127 volts, 15 amperes nominales, el cual alimenta a un tablero de distribución monofásico de 3 hilos, 220/127 volts y 100 amperes de capacidad nominal en las barras; este tablero es el PCC del sistema, ya que en él es donde se integró a la red 3000 Wp de potencia FV, de los cuales 1,500 Wp fueron generados desde un sistema FV conformado por 6 paneles monocristalinos conectados a un inversor central del tipo controlado por voltaje, configuración de puente completo, alta velocidad de conmutación (VSI), y con una capacidad de 3,000 W; entregando en el lado de CA 220/127 volts, 2 fases, 3 hilos. Los otros 1,500 Wp de generación FV fueron integrados desde un sistema constituido por 6 paneles policristalinos conectados individualmente a microinversores (6 en total) de 250 W cada uno, que son controlados

por corriente y disparo por modulación de ancho de pulso, y con un voltaje de salida de 220/127 volts de CA, 2 fases, 3 hilos cada uno.

Desde el tablero de distribución (PCC), se derivó un alimentador monofásico, 2 hilos, 127 volts, 15 amperes hacia diversas cargas (resistivas, inductivas y capacitivas), todas con valores de 30 ohms (los enlaces a los documentos electrónicos que muestran las características técnicas completas de los paneles solares, inversores, tablero de distribución y módulos de cargas, se encuentran en la sección de anexos). El diagrama unifilar de la Fig. 7 muestra el sistema eléctrico que fue utilizado para el estudio.

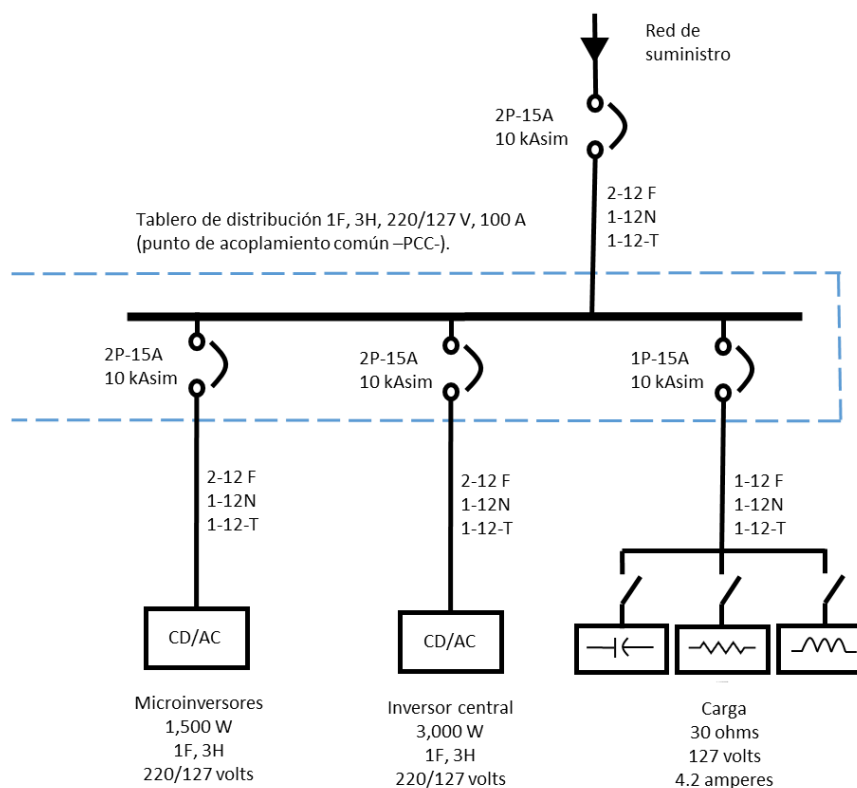


Fig. 7. Diagrama unifilar del sistema eléctrico bajo estudio.

Para determinar las condiciones más desfavorables (mayor THDi) de la red analizada, se desarrolló un DDE. 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 [179], [180], basado en el análisis de la variancia y diseños factoriales completos, así

como la implementación de los métodos de comparaciones o de rangos múltiples (método de diferencias mínimas y la prueba de Duncan) [181], [182].

A. Equipo de Medición, Monitoreo y Adquisición de Datos

Entre los diversos equipos de medición de parámetros eléctricos disponibles para este proyecto, se contó con un analizador de redes eléctricas trifásico de la marca Fluke, modelo 435 serie II (seleccionado y adquirido con las características específicas requeridas para este proyecto; contando con la declaración de calibración del fabricante). Esta herramienta tiene las funciones necesarias para examinar los eventos relacionados con la CEE (incluyendo armónicos de corriente), de forma segura y detallada, tanto en sistemas eléctricos trifásicos como monofásicos. La Fig. 8 muestra el equipo analizador de redes eléctricas y sus accesorios; en la sección de anexos se incluyen los documentos de calibración del equipo.

Mientras tanto, la recolección de datos se llevó a cabo con dos elementos: un sensor de corriente de efecto Hall y una tarjeta de adquisición de datos. El sensor de corriente ACS712 es una solución práctica y sencilla para medir corriente. Internamente trabaja mediante el efecto Hall, que detecta el campo magnético que se produce por inducción de la corriente que circula por la línea que se está midiendo. El sensor entrega una salida de voltaje proporcional a la corriente; dependiendo la aplicación se pueden utilizar sensores para rangos de 5, 20 o 30 amperes respectivamente (20 amperes para nuestro estudio). El funcionamiento adecuado de los sensores de corriente fue corroborado usando equipos de reciente adquisición tales como fuente de CD, generador de funciones, multímetro y osciloscopio, los cuales cuentan con la declaración de calibración del fabricante y los certificados de calibración por parte del Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo (CRODE –ver anexo-).

El sensor ACS712 cuenta con una estructura modular, por lo que se facilitan sus conexiones. Tiene una terminal de empalme para conectar la línea a medir y 3 pines, dos para conectar la alimentación (+5 volts) y un pin para la salida analógica.



Fig. 8. Analizador de redes eléctricas Fluke, modelo 435 serie II.

Tomado de: <https://www.tradeindia.com/fp2020801/Fluke-434-II-Power-Quality-Analyzer.html>

El sensor entrega un valor de 2.5 volts para una corriente de 0A, y a partir de ahí, incrementa el voltaje en forma proporcional de acuerdo a la sensibilidad, teniendo una relación lineal entre la salida de voltaje del sensor y la corriente. En la Fig. 9 se observa el sensor de corriente ACS712

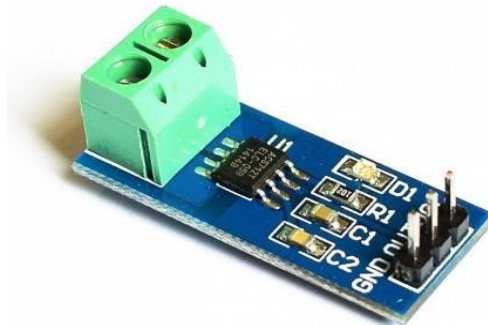


Fig. 9. Sensor de corriente de efecto Hall modelo ACS712-20.

Tomado de: https://naylampmechatronics.com/blog/48_tutorial-sensor-de-corriente-ac712.html

La tarjeta de adquisición de datos utilizada fue la NI-USB-6008 de National Instrument. Este dispositivo es capaz de realizar mediciones de voltaje, cuenta con soporte para la mayoría de los sistemas operativos y realiza la interface con una PC mediante una conexión A/B-USB. Provee 8 canales de entrada, análogas simples (AI) o 4 diferenciales, resolución de entrada de 12 bits, con una frecuencia de muestreo de 10,000 muestras por segundo, rangos de entrada simple de $\pm 10V$ y

diferencial de ± 20 , ± 10 , ± 5 , etc. Posee dos canales de salidas análogas (AO), con una resolución de 12 bits y un rango de 0 a 5V. En cuanto a las entradas y salidas digitales, posee 4 entradas digitales y 8 salidas digitales con un máximo rango de -0.5V a 5.8V con respecto a tierra. También involucra un contador con una resolución de 32 bits y una máxima frecuencia de entrada de 5MHz (los enlaces a los documentos electrónicos que muestran las características técnicas completas de los equipos de medición, monitoreo y de adquisición de datos se encuentran en la sección de anexos). La Fig. 10 muestra la tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6008.



Fig. 10. Tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6008, de National Instruments.
Tomado de: <https://www.directindustry.es/prod/national-instruments/product-5074-1596646.html>

B. Normas y Reglamentos

Leyes, reglas o principios sobre el tema de CEE se implementan a nivel mundial mediante la creación de estándares, que son definidos como acuerdos formales entre las industrias, los consumidores y los gobiernos; donde se establecen los procedimientos para generar, probar, medir y consumir energía eléctrica. Estos estándares internacionales son desarrollados por organismos como el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE por sus siglas en inglés), la Comisión Internacional de Electrotecnia (IEC por sus siglas en inglés), la Comisión Europea de Normalización Electrotécnica (CENELEC por sus siglas en francés), así como el Instituto Nacional Estadounidense de estándares (ANSI por sus siglas en inglés), entre otros. En México, la

Asociación de Normalización y Acreditación, A.C. (ANCE), es uno de los organismos que se encarga, entre otras funciones, de la implementación de normas, así como las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), expedidas por las dependencias oficiales normalizadoras de México, a través de los Comités Consultivos Nacionales de Normalización (*). Algunos de los muchos estándares internacionales publicados acerca de este tema y que fueron tomados como referencia en esta investigación son:

- a) Estándar EN-50160 (Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución) [16]:

Este estándar define los límites para la frecuencia nominal de la tensión suministrada, la amplitud de la tensión, las variaciones de la tensión suministrada, las variaciones rápidas de la tensión (amplitud de las variaciones y severidad del parpadeo), los huecos de tensión, las interrupciones breves y las interrupciones largas del suministro, las sobretensiones temporales y transitorias, el desequilibrio de la tensión suministrada, las tensiones armónicas e interarmónicas y la transmisión de señales de información por la red, así como los protocolos de medida.

- b) Estándar IEEE-519-2014 (Recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia) [34]:

En este documento se establecen los requerimientos para el diseño de sistemas eléctricos, que incluyen cargas lineales y no lineales. Las formas de onda de voltaje y de corriente que pueden existir a través del sistema eléctrico son descritas, y los objetivos de distorsión de la forma de onda para el diseñador del sistema eléctricos son establecidos. Además, se fijan los parámetros de la CEE que debe ser proporcionados en el PCC. Este estándar no cubre los efectos de la interferencia de radiofrecuencia, sin embargo, se ofrece orientación para los sistemas telefónicos alámbricos.

(*) Se consideró el uso de estándares internacionales como una forma de salvar las barreras técnicas en el intercambio y difusión del conocimiento, derivadas de las diferentes normas y reglamentos desarrollados por cada nación, por organizaciones de normalización nacionales o por las empresas.

c) Estándar IEEE 1159-2019 (Recomendaciones prácticas para el monitoreo de la CEE) [106]:

En este estándar se cubre el monitoreo de la CEE de sistemas de potencia de CA, definiciones de terminología de CEE, impacto de la calidad deficiente de la potencia sobre el equipo de la compañía suministradora y del consumidor, así como la medición del fenómeno electromagnético. Los capítulos clave son: objetivos del monitoreo, instrumentos de medición, técnicas de aplicación del monitoreo e interpretación de los resultados del monitoreo.

Actualmente, los estándares relacionados con la CEE más aceptados a nivel internacional vienen de la IEC y del IEEE; sin embargo, el analizador de redes utilizado en el monitoreo de parámetros eléctricos para este proyecto de investigación, solo contempla los límites recogidos en la normativa EN50160, que forma parte de los estándares publicados por la CENELEC.

C. Pasos para el Desarrollo de la Investigación

En la realización de este proyecto, fueron desarrollados una serie de pasos para la investigación, los cuales se resumen en cuatro secciones fundamentales:

- Conformación del banco de pruebas, sistema de medición y sistema de adquisición de datos.
- Selección y desarrollo del DDE.
- Procesamiento digital de las señales.
- Determinación y aplicación de la RNA para el modelado y predicción.

Para el desarrollo y conformación del banco de pruebas se efectuaron las siguientes actividades:

1. Constitución del banco de pruebas. En este punto se conjuntaron los equipos (Módulos FV, inversores, tablero de distribución, módulos de carga (resistores, inductores y capacitores); con el propósito de contar con las condiciones adecuadas para realizar las mediciones requeridas y estructurar un DDE.
2. Configuración del equipo de medición. Se ajustaron los parámetros de monitoreo para el analizador de redes eléctricas, en base a la topología eléctrica del banco de pruebas y a la normativa de referencia en el equipo de medición.

3. Adecuación y configuración de los equipos para la adquisición de datos. En este punto, la tarjeta de adquisición de datos y los sensores de corriente, fueron seleccionados y conectados en forma adecuada. Además, se prepararon los equipos y programas de cómputo especializados para la recolección, manejo y análisis de las mediciones.

En la selección y desarrollo del DDE se llevaron cabo las siguientes acciones:

1. Determinación del DDE. Mediante mediciones preliminares del THDi, se determinó la información necesaria para desarrollar y aplicar el ANDEVA y los modelos factoriales completos.
2. Recolección de datos. Mediante la ejecución de las pruebas diseñadas en el DDE, se obtuvieron los datos para el ANDEVA y los modelos factoriales completos.
3. ANDEVA. Con los datos obtenidos de las mediciones, se realizó el ANDEVA para cada uno de los casos previstos.
4. Análisis de los modelos factoriales. Con los datos obtenidos de las mediciones, se realizó el análisis de los modelos factoriales completos para cada uno de los casos previstos.
5. Análisis de resultados. Mediante los criterios dictados por las metodologías experimentales utilizadas (ANDEVA, modelos factoriales, diferencias mínimas, prueba de Duncan), se analizaron los resultados.

En el análisis frecuencial de las señales se utilizaron los siguientes pasos:

1. Preparación del banco de pruebas. En este punto se conjuntaron los equipos (Módulos FV, inversor, tablero de distribución, módulo de resistencias), según lo establecido en el DDE previamente realizado, con el propósito de contar con las condiciones adecuadas para llevar a cabo la adquisición de datos.
2. Conexión y configuración de los equipos de adquisición: Se conectaron y configuraron los equipos (tarjeta de adquisición, sensor de corriente y programas de cómputo), para la adquisición de datos eléctricos.
3. Adquisición de datos. Se adquirieron datos de las corrientes en el alimentador de la red de suministro (con y sin aportaciones del inversor).
4. Exportación de datos. Mediante el uso de los programas de cómputo SignalExpress y Excel, se generaron los vectores para su posterior análisis en el entorno Matlab.

5. Análisis mediante Matlab. Utilizando las herramientas matemáticas y estadísticas para análisis de las señales, se obtuvieron la caracterización de las armónicas contenidas en las corrientes del inversor y en la red de suministro utilizando Matlab.
6. Análisis de resultados. Se estudiaron los resultados arrojados por los análisis matemáticos y estadísticos de las señales muestreadas para la obtención de resultados y conclusiones.

Par la determinación y aplicación de la RNA se realizaron las siguientes actividades:

1. Preparación del banco de pruebas. En este punto se debió conjuntar los equipos (Módulos FV, inversor, tablero de distribución, módulo de resistencias), con el propósito de contar con las condiciones adecuadas para llevar a cabo la adquisición de datos, según los requerimientos de la RNA aplicada.
2. Conexión y configuración de los equipos de adquisición. Se conectaron y configuraron los equipos (tarjeta de adquisición, sensores de corriente y programas de cómputo), para la adquisición de datos eléctricos en forma individual (en el alimentador de red) y simultánea (en los alimentadores de red e inversor).
3. Adquisición de datos de referencia. Se adquirieron los datos de la corriente en el alimentador de red conectado al PCC de donde se alimentaron las cargas resistivas sin aportaciones de potencias desde el sistema FV.
4. Adquisición de datos para el modelado. Se adquirieron en forma simultánea los datos de las corrientes inyectadas al nodo de carga (PCC), por parte del inversor y de la red, alimentando simultáneamente cargas resistivas.
5. Exportación de datos. Mediante el uso de los programas de cómputo SignalExpress y Excel, se generaron los vectores que alimentaron a las RNA.
6. Determinación de las RNA a utilizar. Mediante el análisis exhaustivo de las diversas arquitecturas de RNA, se determinó cuáles de ellas era las más adecuadas para el modelado y predicción del sistema.
7. Estructuración de las RNA. Mediante la caja de herramientas de aprendizaje profundo de Matlab, se generaron los algoritmos de las RNA a utilizar.
8. Aplicación de las RNA. Utilizando los datos de las corrientes en el alimentador del inversor como entrada y los de la red de suministro como objetivo, se entrenaron, validaron y probaron las RNA.

9. Análisis de resultados. Se estudiaron los resultados del modelado y predicción del sistema dinámico en el PCC, para la obtención de resultados.

Al final de las actividades anteriormente descritas, se llevaron a cabo la discusión de los resultados y las conclusiones de la investigación.

VI. DESARROLLO

A. Construcción del Banco de Pruebas

Para la construcción del banco de pruebas se utilizaron dos arreglos FV. El primer arreglo consta de 6 paneles solares monocristalinos con una potencia máxima por panel de 250W y un voltaje en máxima potencia de 31.1 volts. El segundo arreglo FV está constituido por 6 paneles policristalinos con una potencia máxima por panel de 250W y un voltaje en máxima potencia de 31.7 volts.

La salida de potencia del arreglo monocristalino fue conectado a un inversor central para interconexión a la red, del tipo controlado por voltaje, configuración de puente completo, alta velocidad de conmutación y con una capacidad de 3,000 W; entregando en el lado de CA, 220/127 volts, 2 fases, 3 hilos. Cada panel del arreglo policristalino fue conectado a las terminales de entrada de un microinversor controlado por corriente y disparo por modulación de ancho de pulso (6 en total), de 250 W y con un voltaje de salida de 220/127 volts de CA, 2 fases, 3 hilos cada uno.

Las salidas de potencia de CA tanto del inversor central, así como del conjunto de microinversores fueron conectadas al PCC, que en este caso se conformó por un tablero de distribución de 220/127 volts, 100 amperes, 2 fases, 3 hilos; un tercer alimentador (red de suministro de 220/127 volts, 2 fases, 3 hilos) fue conectado al mismo PCC, de tal manera que las tres fuentes pudieran suministrar potencia al PCC en forma individual y conjunta. Módulos de cargas variables resistivas, inductivas y capacitivas, fueron conectados al tablero de distribución, de forma que pudieran ser alimentados individualmente o en forma conjunta por las tres fuentes de potencia (ambos sistemas solares y por la red de suministro). Las diferentes cargas se ajustaron para demandar 4.2 amperes del nodo de alimentación a un voltaje de 127. En la Fig. 11 se muestra el diagrama esquemático general para la conformación del banco de pruebas.

Mientras la Fig. 12 muestra el diagrama de conexiones de los diversos alimentadores al PCC. En esta figura se observa la conexión de las tres fuentes de potencia en el PCC y la alimentación hacia los diferentes tipos de cargas desde el tablero de distribución.

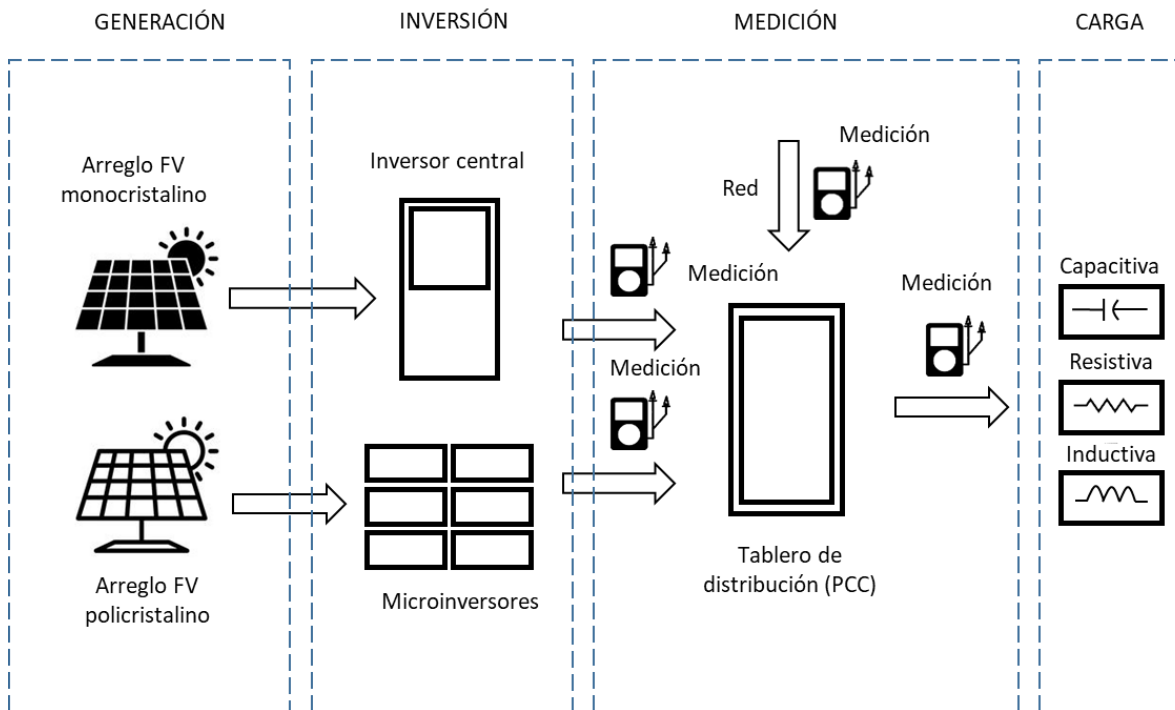


Fig. 11. Diagrama esquemático general del banco de pruebas.

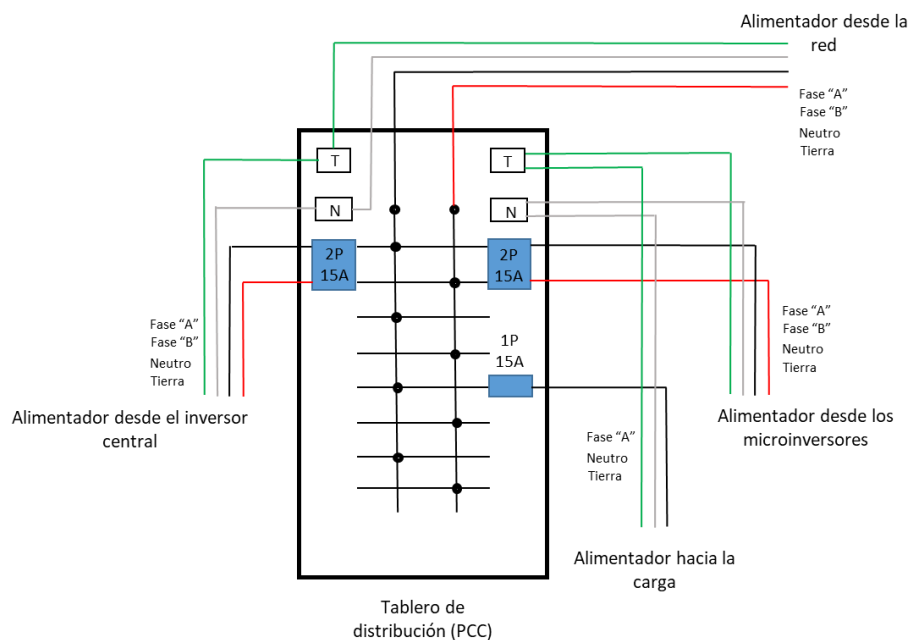


Fig. 12. Diagrama de conexiones de los alimentadores al PCC y hacia las cargas.

En la Fig. 13 se muestran los diagramas esquemáticos utilizados para la conexión de los módulos e inversores de los sistemas monocristalinos y policristalinos, exponiendo los alimentadores en CD y AC de ambos sistemas de generación FV.

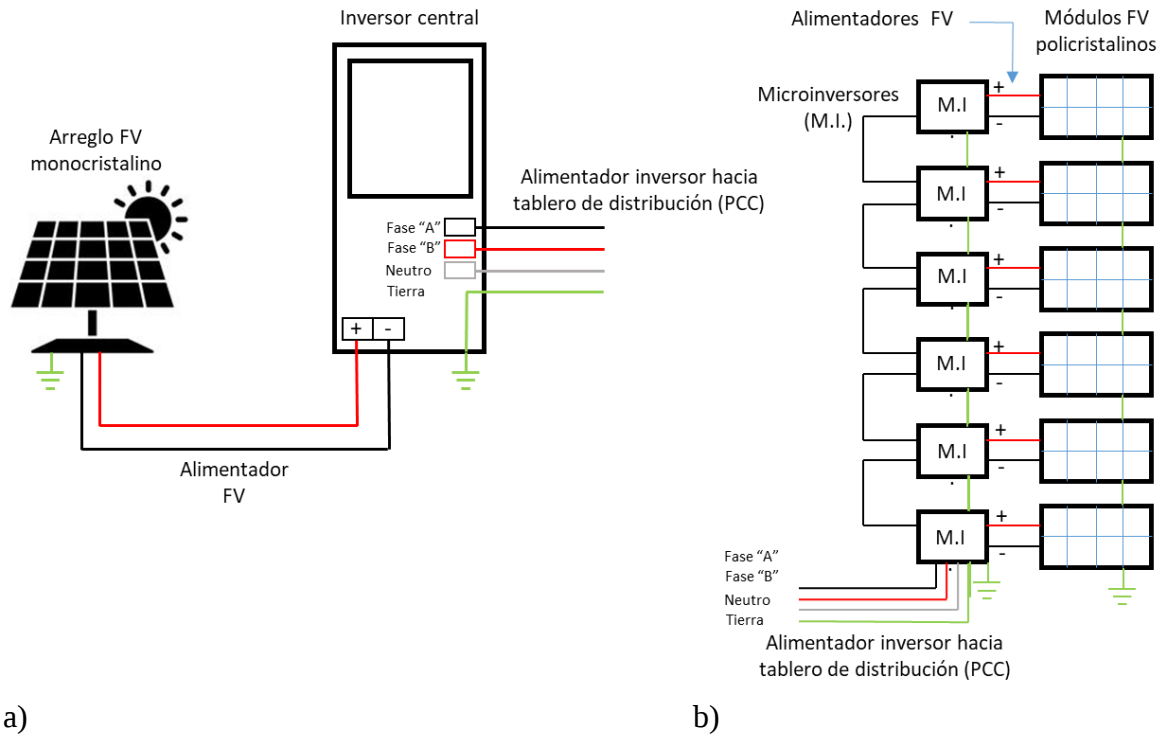


Fig. 13. Diagramas esquemáticos para la conexión de módulos e inversores: a) Sistema con paneles monocristalinos. b) Sistema con paneles policristalinos.

En la Fig. 14 se muestran varias imágenes de la conformación de los diversos elementos del banco de pruebas, en ellas se observan los módulos FV, inversores, el tablero de distribución, los diversos tipos de cargas y los alimentadores eléctricos.



a) Arreglo FV conformado por 6 paneles policristalinos de 250 W de salida por modulo, 31.7 volts a máxima potencia, una corriente a potencia máxima de 7.88 amperes y una corriente de cortocircuito de 8.49 amperes; con un rango de temperatura de operación que oscila entre los -40°C y los 85°C.

b) Arreglo FV conformado por 6 paneles monocristalinos de 250 W de salida por modulo, 31.1 volts a máxima potencia, una corriente a potencia máxima de 8.04 amperes y una corriente de cortocircuito de 9.08 amperes; con un rango de temperatura de operación que oscila entre los -40°C y los 85°C.



c) Arreglo de microinversores de 250 W, controlados por corriente y disparo por modulación de ancho de pulso (PWM). Con un voltaje de salida de 220/127 volts, 1.02 amperes y una THDi menor al 3.5% cada uno. Con una temperatura de operación que oscila entre los -40°C y los 65°C.

d) Inversor central de 3, 000 W, controlado por voltaje, de puente completo y alta frecuencia de conmutación, con un voltaje de salida de 220/127 volts, 10 amperes por canal y una THDi menor al 2.0%. Cuenta con una temperatura de operación que oscila entre los - 25°C y los 60°C.



e) Tablero de distribución principal utilizado como PCC; 220/127 volts CA, 100 amperes, 1 fase, 3 hilos, 24 espacios, tipo sobreponer. NEMA 1 (para ser instalado en interiores), con barras principales de cobre plateado. Temperatura de operación que oscila entre los - 5°C y los 40°C.

f) Módulos de cargas variables resistiva, inductiva y capacitiva, con valores de impedancia de 300/600/1200 ohms, voltaje nominal de 120 volts CA, de 12 a 84 W/VAr, con una tolerancia del $\pm 5\%$. Con incrementos de corriente de 0.1 amperes cada paso.



Fig. 14. Imágenes de los elementos que constituyen el banco de pruebas.

B. Configuración del Analizador de Redes Eléctricas

El analizador de redes eléctricas fue configurado para medir sistemas monofásicos a 2 hilos a 127 volts, con sus transformadores de corriente tipo pinzas ajustadas a 40 amperes. La opción seleccionada fue la de “armónicos”, la cual permite monitorear la THD de corriente, voltaje y potencia bajo los criterios de la norma EN 50160. En la Fig. 15 se muestra la pantalla del analizador de redes eléctricas, donde se aprecia el menú de opciones, de las cuales fue seleccionada la opción “Armónicos”. Además, se muestra la pantalla donde fue monitoreado el valor del THDi y las armónicas individuales.

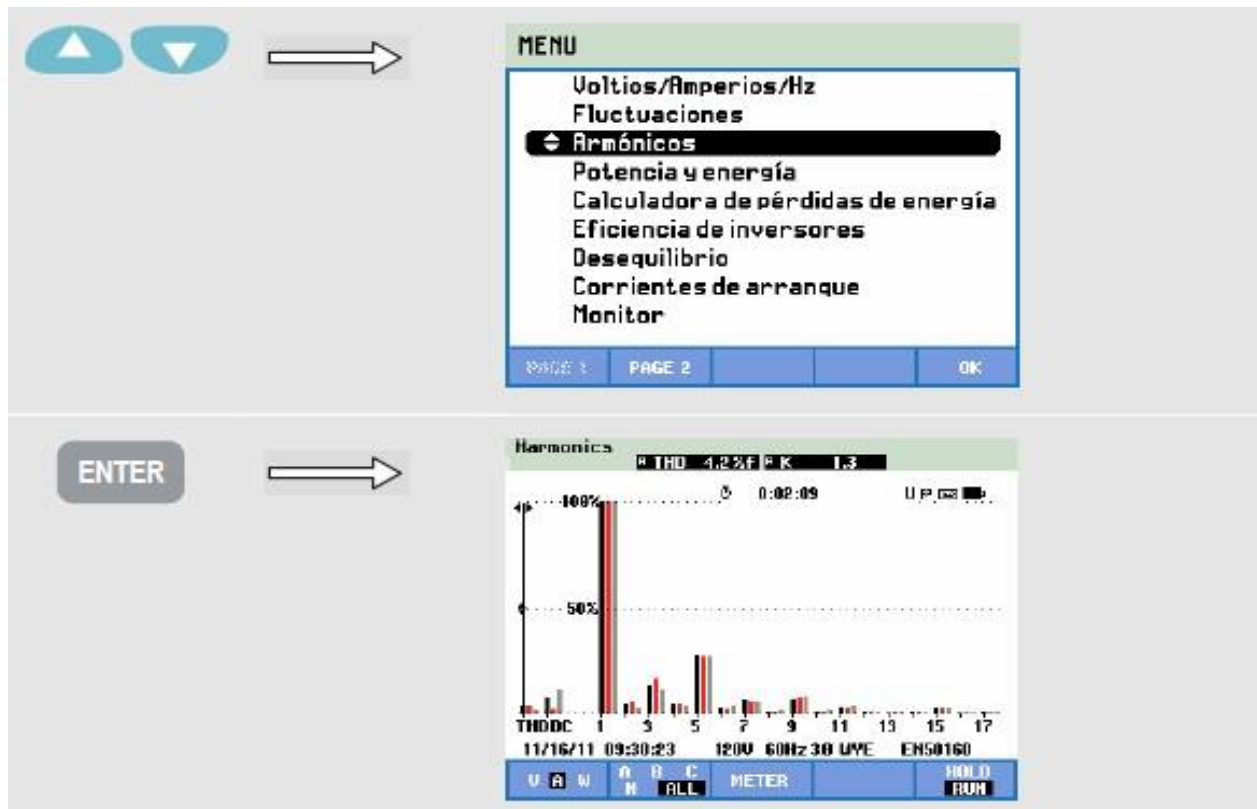


Fig. 15. Pantallas del analizador de redes eléctricas: a) Pantalla menú de opciones. b) Pantalla THD e IHD de corriente.

Tomado de: https://www.cedesa.com.mx/pdf/fluke/fluke_434II-435II_user_manual.pdf

C. El Diseño de Experimentos

Usando las teorías del diseño experimental tales como el ANDEVA y diseños factoriales completos, así como métodos de comparaciones de rangos múltiples o pruebas de rango múltiple (método de diferencias mínimas y la prueba de Duncan) [181], [182], se estudiaron las tendencias de los flujos de armónicos de corriente mediante la medición del THDi en el punto de interconexión de un sistema eléctrico bajo condiciones controladas, en donde convergen generación eléctrica renovable no convencional (integración de energía FV mediante inversores electrónicos de potencia) y la red eléctrica del suministrador (RES); alimentando cargas resistivas (CR), cargas inductivas (CL) y cargas capacitivas (CC). La metodología para determinar la tabla ANDEVA, se halla reportada a detalle en [183], [184].

Mediante mediciones preliminares del THDi en diversos puntos (alimentadores), en el banco de pruebas, se logró determinar los tratamientos adecuados para los diversos análisis comparativos (ANDEVA) del THDi, así como los factores y sus correspondientes niveles para la determinación de los arreglos factoriales completos a utilizar. Para la comparación de medias se definieron 19 experimentos con 6 factores cada uno y dos réplicas, para los arreglos factoriales completos se definieron 2 experimentos (uno para la RES y otro para la carga), con tres factores (Inversor #1-microinversores-, inversor #2 -inversor central- y tipo de carga -CR, CL y CC-), cada uno a tres niveles (0, 1 y 4.5 amperes de generación para los inversores #1 y #2, CR, CL y CC para el tipo de carga); llevándose a cabo dos replicas por cada condición experimental.

La Tabla II muestra los criterios considerados para el ANDEVA, describiendo cada uno de los experimentos realizados.

Tabla II. Experimentos para el ANDEVA.

No.	EXPERIMENTO
1	Comparación del THDi entre el alimentador de la RES y el alimentador hacia las cargas (CR, CL, CC -inversores desconectados-)
2	Comparación del THDi en el alimentador del inversor #2 en baja generación (1 A) y en alta generación (4.5 A) para diferentes tipos de cargas (CR, CL, CC).
3	Comparación del THDi en el alimentador del inversor #1 en baja generación (1 A) y en alta generación (4.5 A) para diferentes tipos de cargas (CR, CL, CC).
4	Comparación del THDi en el alimentador de la RES contra los niveles de THDi en el alimentador hacia la carga (CR, CL, CC), con el inversor #2 en baja generación (1 A).
5	Comparación del THDi en el alimentador de la RES contra los niveles de THDi en el alimentador hacia la carga (CR, CL, CC), con el inversor #2 en alta generación (4.5 A).
6	Comparación del THDi en el alimentador de la RES contra los niveles de THDi en el alimentador hacia la carga (CR, CL, CC), con el inversor #1 en baja generación (1 A).

7	Comparación del THDi en el alimentador de la RES contra los niveles de THDi en el alimentador hacia la carga (CR, CL, CC), con el inversor #1 en alta generación (4.5 A).
8	Comparación del THDi en el alimentador de la RES con cargas (CR, CL y CC), sin alimentación del inversor; contra el THDi en el mismo alimentador con igual patrón de cargas pero con el inversor #2 en baja generación (1 A).
9	Comparación del THDi en el alimentador de la RES con cargas (CR, CL y CC), 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).
10	Comparación del THDi en el alimentador hacia las cargas (CR, CL y CC), sin alimentación del inversor; contra el THDi en el mismo alimentador con igual patrón de cargas pero con el inversor #2 en baja generación (1 A).
11	Comparación del THDi en el alimentador hacia las cargas (CR, CL y CC), 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).
12	Comparación del THDi en el alimentador de la RES con cargas (CR, CL y CC), sin alimentación del inversor; contra el THDi en el mismo alimentador con igual patrón de cargas pero con el inversor #1 en baja generación (1 A).
13	Comparación del THDi en el alimentador de la RES con cargas (CR, CL y CC), sin alimentación del inversor; contra el THDi en el mismo alimentador con igual patrón de cargas pero con el inversor #1 en alta generación (4.5 A).
14	Comparación del THDi en el alimentador hacia las cargas (CR, CL y CC), sin alimentación del inversor; contra el THDi en el mismo alimentador con igual patrón de cargas pero con el inversor #1 en baja generación (1 A).
15	Comparación del THDi en el alimentador hacia las cargas (CR, CL y CC), sin alimentación del inversor; contra el THDi en el mismo alimentador con igual patrón de cargas pero con el inversor #1 en alta generación (4.5 A).
16	Comparación del THDi en el alimentador de la RES cuando los inversores #1, #2 y la combinación de ambos operan sin carga conectada al nodo, en baja generación (1 A) y en alta (4.5 A).
17	Comparación del THDi en el alimentador de la RES contra los niveles de THDi en el alimentador hacia la carga (CR, CL, CC), con el inversor #2 en generación nula (0 A).
18	Comparación del THDi en el alimentador de la RES contra los niveles de THDi en el alimentador hacia la carga (CR, CL, CC), con el inversor #1 en generación nula (0 A).
19	Comparación del THDi en el alimentador de la RES contra los niveles de THDi en el alimentador hacia la carga (CR, CL, CC), con los inversores #1 y #2 (en paralelo) con generación nula (0 A).

Se realizaron en forma aleatoria 228 mediciones para las diferentes comparaciones de medias, utilizando el ANDEVA y la metodología de diferencias mínimas; verificando los resultados obtenidos con la prueba de Duncan. Además, se realizaron 108 mediciones aleatorias para dos experimentos factoriales completos.

Con los datos obtenidos de las mediciones, se realizó el ANDEVA para cada uno de los casos

previstos. En la Tabla III se muestra como ejemplo el análisis para el caso número 1 descrito en la

RED DE SUMINISTRO VS ALIMENTADOR DE CARGA						
	R _C	R _L	L _C	L _L	C _C	C _L
	1.38	1.62	1.92	1.89	9.98	9.62
	1.76	1.75	1.99	1.97	9.55	10.26
T.j=total	3.14	3.37	3.91	3.86	19.53	19.88
Y.j= media	1.57	1.69	1.96	1.93	9.77	9.94

la Tabla muestra ejemplo para el

Tabla II,

en donde se compara el THDi en la RES contra el THDi en el alimentador hacia la carga, sin inyectar ningún tipo de generación de los inversores en el nodo de conexión.

Tabla III. ANDEVA para el caso número 1 de la Tabla II: a) Tabla de datos. b) Tabla para el ANDEVA.

a)

ANDEVA					
	SS	g.l.	MS	F _{exp}	F _{0.05,5,6}
Factor	173.80	5	34.76	579.33	4.39
Error	0.38	6	0.06		
Total	174.19	11			

b)

En la Tabla IV se muestran los valores para determinar las interacciones entre los factores tomados en cuenta en la aplicación del experimento factorial completo en el alimentador de la RES, así como el ANDEVA en dicho alimentador.

Con la información obtenida del ANDEVA, se utilizaron los métodos de diferencias mínimas y la prueba de Duncan para determinar el nivel de significancia en la comparación de medias.

Al término del desarrollo no se encontraron diferencias significativas entre los niveles de THDi presentes en el alimentador de la RES y en el de la carga, para los diferentes tipos de elementos conectados al nodo cuando se comparan cargas iguales (R_L-R_C , L_L-L_C , C_L-C_C) sin presencia de inversores.

Tabla IV. Experimento factorial completo: a) Tabla de datos. b) Tabla para el ANDEVA.

		INVERSOR CENTRAL			CARGA																
		0.0 A	1.0 A	4.5 A	R	L	C														
M. INV.		40.93	52.53	52.52	44.98	30.25	70.75														
		51.20	54.64	48.14	47.53	27.59	78.86														
		63.94	57.24	35.67	58.43	25.46	72.96														
		156.07	164.41	136.33	150.94	83.30	222.57														
THDi EN ALIMENTADOR DE RED																					
INVERSOR CENTRAL																					
0 AMPERES					1 AMPERE			4.5 AMPERES													
		R		L		C		R		L		C									
M-INVERSORES	0.0 A	4.59	9.59	5.86	11.53	9.80	19.81	6.34	13.25	5.76	11.63	14.23	27.65	10.75	22.14	3.62	7.09	11.54	23.29	145.98	
		5.00		5.67		10.01		6.91		5.87		13.42		11.39		3.47		11.75			
	1.0 A	7.21	13.73	5.36	10.72	13.35	26.75	8.3	16.15	4.87	9.76	14.96	28.73	8.49	17.65	3.47	7.11	11.74	23.38	153.98	
		6.52		5.36		13.4		7.85		4.89		13.77		9.16		3.64		11.64			
	4.5 A	12.59	25.51	4.82	9.32	15.03	29.11	10.72	21.26	4.56	8.92	13.87	27.06	5.87	11.66	3.52	7.22	8.62	16.79	156.85	
		12.92		4.5		14.08		10.54		4.36		13.19		5.79		3.7		8.17			
	Totales B x		48.83		31.57		75.67		50.66		30.31		83.44		51.45		21.42		63.46		456.81
	C T.J...		156.07					164.41					136.33								

a)

A. ALIMENTADOR DE RED				
	SS	g.l.	M.S.	F _{EXP}
A) Microinversores	3.5	2	1.75	20.35
B) Inversor Central	23.1	2	11.55	134.30
C) Tipo de carga	538.9	2	269.45	3133.14
AB	94.7	3	31.57	367.05
AC	563.7	3	187.9	2184.88
BC	583.5	3	194.5	2261.63
ABC	-1070.1	2	-535.05	-6221.51
Error	3.096	36	0.086	
Total	740.5	53		

b) Cuando se compararon los THDi en los alimentadores de los inversores #1 y #2 en baja generación (1 A) contra los niveles de THDi en alta generación (4.5 A), para diferentes tipos de cargas (CR, CL y CC), se encontraron diferencias significativas en los niveles de THDi en ambos alimentadores, presentando mayor THDi a baja generación en ambos casos.

Al comparar el THDi en el alimentador de la RES contra los niveles de THDi en el alimentador hacia la carga (CR, CL, CC), con el inversor #2 en baja generación (1 A) y alta generación (4.5 A), se encontraron diferencias significativas en los niveles de THDi existentes en el alimentador de la RES en comparación con los niveles en el alimentador hacia la carga, siendo mayor en la RES cuando se alimentan los diferentes tipos de carga (CR, CL, CC).

Al relacionar el THDi en el alimentador de la RES contra los niveles de THDi en el alimentador hacia la carga (CR, CL, CC), con el inversor #1 en baja generación (1 A), se encontraron diferencias significativas en los niveles de THDi), siendo mayor en la RES cuando se alimentan CR y CC y no significativa cuando se alimenta CL. Por otra parte, al comparar el mismo alimentador en alta generación (4.5 A), se encontraron diferencias significativas en los niveles de THDi, siendo mayor en la RES cuando se alimentan CR y CL y no significativa cuando se alimenta CC.

Examinando los niveles de THDi en el alimentador de la RES con CR, CL y CC, sin alimentación de los inversores, contra el THDi en el mismo alimentador con igual patrón de cargas, pero con los inversores #1 y #2 en baja generación (1 A) y alta generación (4.5 A), se obtuvieron resultados significativamente mayores en el alimentador de la RES (para todos los tipos de carga), en comparación con la THDi en el mismo alimentador sin los inversores conectados al nodo.

Al contrastar los niveles de THDi en el alimentador hacia las cargas (CR, CL y CC), sin alimentación de los inversores, contra el THDi en el mismo alimentador con igual patrón de cargas pero con los inversores #1 y #2 en baja generación (1 A) y alta generación (4.5 A), no se observaron diferencias significativas entre ambos valores de THDi para CR y CL bajo las

condiciones antes descritas; no así en la comparación del THDi con CC, donde es significativamente mayor el THDi en el alimentador de la carga.

Cuando se realizó la comparación del THDi en el alimentador de la RES, con los inversores #1, #2 y la combinación de ambos operando sin carga conectada al nodo y generación en baja (1 A) y en alta (4.5 A), se puso de manifiesto que la THDi es significativamente mayor en el alimentador de la RES cuando los inversores #1, #2 y la combinación de ambos, operan en baja generación, comparados con los valores de THDi obtenidos para generación alta.

Al cotejar separadamente el THDi en el alimentador de la RES, contra los niveles de THDi en el alimentador hacia la carga (CR, CL, CC), con los inversores #1 y #2 en generación nula (0 A), se observó que no se presentan diferencias significativas en los valores de THDi obtenidos en el alimentador de la RES y en el alimentador hacia las cargas, cuando el inversor #1 no genera corriente; mientras que en este mismo alimentador se presentaron valores de THDi significativamente mayores en el alimentador de la RES (para todos los tipos de carga) cuando el inversor #2 no genera corriente, en comparación con la THDi en el alimentador hacia las cargas sin generación en el inversor.

Finalmente, al comparar el THDi en el alimentador de la RES contra los niveles de THDi en el alimentador hacia la carga (CR, CL, CC), con los inversores #1 y #2 (en paralelo) con generación nula (0 A), se determinó que la THDi es significativamente mayor en el alimentador de la RES (para todos los tipos de carga) en comparación con la THDi en el alimentador hacia las cargas sin generación en el inversor.

Con referencia al experimento factorial, en la Tabla IV (b) se muestran los resultados de analizar la varianza de los datos del THDi en la RES y en la carga. Como puede observarse, los efectos e interacciones más significativos son: el tipo de carga, la interacción de los inversores con la carga y a menor grado la interacción de ambos inversores.

Al finalizar el experimento, se determinó que la conjunción del sistema FV en alta potencia de generación que utiliza el inversor central (inversor #2), con carga resistiva, es el arreglo donde se presenta la mayor THDi, esto se determinó debido a que las armónicas de corriente generadas por los inversores aparecen predominantemente en el alimentador de la RES, en comparación con los niveles de armónicos en el alimentador hacia la carga, siendo hasta un 544% mayor en la RES que en la carga, cuando el inversor #2 alimenta resistencias con generación alta (4.5A), mostrándose esta tendencia en los experimentos no. 4, 5, 6, 7 y 16; por lo que esta configuración fue utilizada

para obtener los datos con los que se caracterizó el fenómeno armónico de corriente y también para el modelado y predicción mediante RNA.

D. Análisis de las Señales

Para la configuración del banco de pruebas en donde se registraron los datos de corriente que fueron usados en la caracterización de la distorsión armónica, se conjuntó la generación de los paneles FV monocristalinos y el inversor central, conectándolos al tablero de distribución eléctrico (PCC), del cual fueron energizadas solo las cargas resistivas. Dicho tablero fue alimentado tanto por el sistema FV como por la red de suministro, de tal manera, que ambas fuentes pudieran alimentar potencia a la carga en forma conjunta o separadamente. La carga resistiva fue ajustada a 30 ohms para demandar 4.2 amperes del nodo de alimentación, a un voltaje de 127 volts. En la Fig. 16 se muestra el diagrama esquemático del banco de pruebas para la adquisición de datos utilizados en la caracterización de las señales. La topología de esta configuración fue basada en el DDE anteriormente descrito.

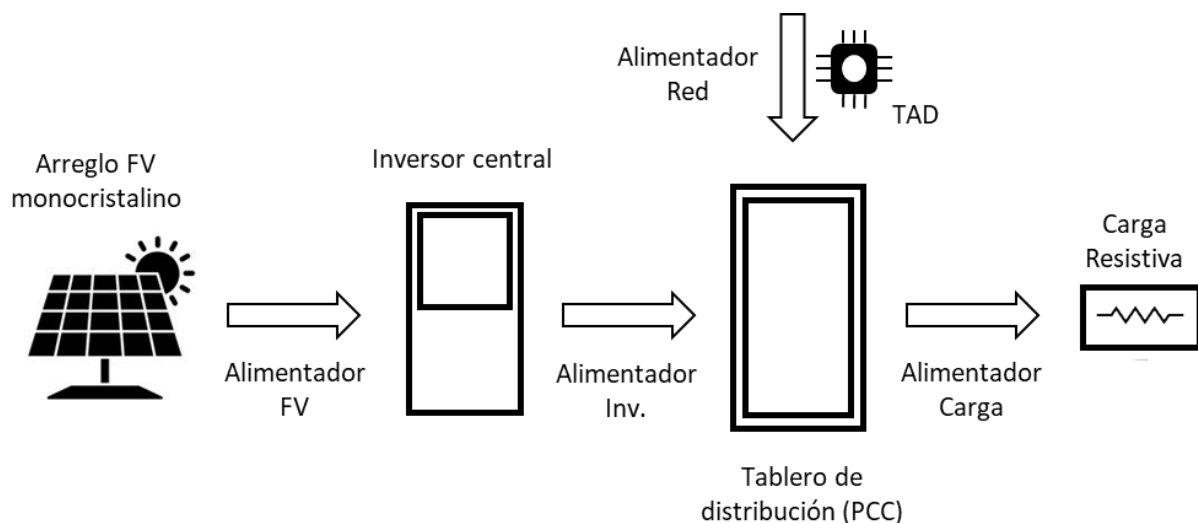


Fig. 16. Disposición del banco de pruebas para la adquisición de datos tendientes a la caracterización de las señales, mostrando los elementos que lo componen.

En la Fig. 17 se muestran imágenes reales del banco de pruebas para la adquisición de datos que fueron utilizados en la caracterización de las señales, donde puede observarse la conexión de los diferentes elementos como son el inversor central, tablero de distribución eléctrico y el módulo

de resistencias variables (carga), así como las protecciones termomagnéticas, los diversos alimentadores FV y la red de suministro.



a) Inversor central y alimentador FV conectado al tablero de distribución (PCC), así como alimentador de red conectado al mismo PCC. En la fotografía también se observan los conductores que conforman cada alimentador y los interruptores termomagnéticos que los protegen.

b) Módulo de carga variable resistiva, que es alimentado desde el tablero de distribución (PCC). En la fotografía también se observan los conductores que conforman cada alimentador y los interruptores termomagnéticos que los protegen.



Fig. 17. Imágenes del banco de pruebas para la adquisición de datos en el alimentador de red, tendientes a la caracterización de las señales.

El conductor de fase del alimentador de red fue interceptado, y se conectó en serie un sensor de corriente de efecto Hall de 20 amperes y 220/127 volts, modelo ACS712 (entre sus terminales Fuente y Carga IP+ e IP-); dicho sensor entrega a su salida un voltaje analógico que varía en forma lineal de acuerdo a la corriente censada. El voltaje de polarización de 5 Vcd fue aplicado entre las terminales Vcc y GND. Para la adquisición de datos se utilizó una tarjeta NI-USB-6008 (TAD) de National Instruments, que es un dispositivo multifunción con entradas / salidas analógicas y

digitales, 12 bits de resolución y 10,000 muestras / segundo, con lo cual se tomaron 50,000 muestras (en un tiempo de 5 segundos –a una tasa de muestreo de 10,000 muestras/segundo-) para cada señal considerada. Las terminales IA3 e IA7 de la tarjeta de adquisición fueron conectadas a las terminales VIout y GND del sensor de corriente ACS712. La tarjeta de adquisición fue enlazada a una computadora mediante un cable USB-A/B para la transferencia de la información. La Fig. 18 muestra las conexiones entre los diferentes dispositivos y equipos para la adquisición de datos.

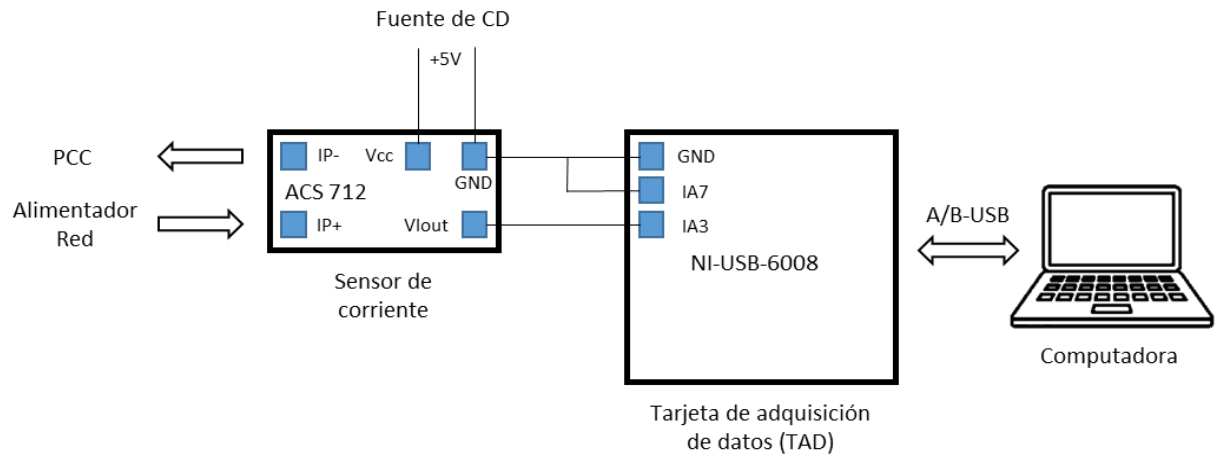
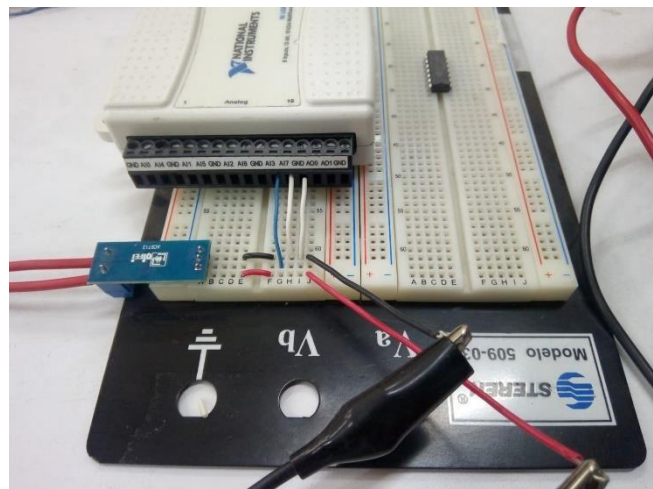


Fig. 18. Diagrama de conexión de dispositivos para la adquisición de datos utilizados en la caracterización de las señales.

En la Fig. 19 se muestran imágenes reales del sistema de adquisición de datos, donde puede observarse la conexión de los diferentes elementos como son el sensor de efecto Hall, la tarjeta de adquisición y el equipo de cómputo, así como el alimentador de red interceptado.

a) Conexión del sensor de corriente de efecto Hall en el alimentador de red de suministro (conductores rojos sobre las terminales IP+ e IP -); polarización con 5 volts CD del sensor y conexiones hacia la tarjeta de adquisición de datos (conductores de color rojo y negro en las terminales VIout y GRD del sensor).





b) Conexión de la tarjeta de adquisición de datos, recibiendo la señal desde el sensor de corriente de efecto Hall (conductores de color azul y blancos que se conectan a las terminales IA3, I A7 y GRD de la tarjeta , respectivamente). Se muestra también la conexión con el equipo de cómputo a través de un cable A/B-USB.

Fig. 19. Imágenes del sistema de adquisición de datos para la caracterización, mostrando la conexión del sensor de corriente y la TAD.

Mediante el programa de cómputo SignalExpress (el enlace al documento electrónico que muestra las características técnicas completas del programa de cómputo SignalExpress, se encuentra en la sección de anexos), se llevó a cabo la recolección y procesamiento inicial de los datos capturados, los cuales consistieron en 50,000 muestras (5 segundos) para la señal de corriente en la red sin aportación del inversor y 50,000 muestras más de la señal de corriente con aportación del inversor. En la Tabla V se muestran las mediciones realizadas en cada uno de los puntos analizados.

Tabla V. Descripción y condiciones de la adquisición de datos para la caracterización.

ADQUISICIÓN DE DATOS		
No	Descripción	Condiciones de adquisición
1	Alimentador de la red de suministro	Sin aportación de corriente por parte del inversor y carga resistiva en el PCC
2	Alimentador de la red de suministro	Con aportación de corriente por parte del inversor y carga resistiva en el PCC

Con los datos adquiridos se generaron vectores en el programa de cómputo Excel, los cuales fueron exportados al entorno Matlab. Utilizando herramientas estadísticas y matemáticas para el análisis frecuencial, se obtuvieron los resultados correspondientes al comportamiento armónico de las señales.

E. Recolección de Datos para el Modelado y Predicción

Para la puesta a punto del banco de pruebas en donde se obtuvieron los datos de corriente que fueron utilizados en el modelado y predicción del fenómeno armónico, se conjuntó nuevamente la generación de los paneles FV monocristalinos y el inversor central, conectándolos al PCC, del cual fueron energizadas solo las cargas resistivas. Dicho tablero fue alimentado tanto por el sistema FV como por la red de suministro, de tal manera que ambas fuentes pudieran entregar potencia a la carga en forma conjunta o separadamente. La carga resistiva fue ajustada a 30 ohms para demandar 4.2 amperes del nodo de alimentación, a un voltaje de 127 volts. En la Fig. 20 se muestra el diagrama esquemático del banco de pruebas para la recolección de datos utilizados en el modelado y predicción del fenómeno armónico de corriente. La topología de esta configuración fue basada en el DDE anteriormente descrito.

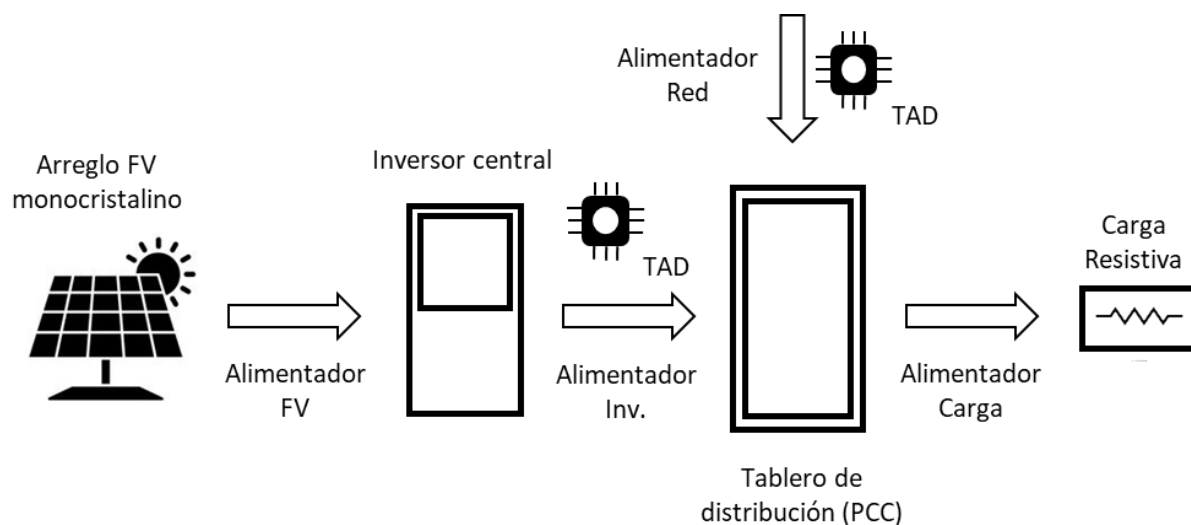


Fig. 20. Disposición de elementos en el banco de pruebas para la adquisición de datos a utilizar en el modelado y predicción del fenómeno armónico.

Los conductores de fase en cada alimentador (inversor y red de suministro), fueron interceptados y conectados en serie con los sensores de corriente ACS712, para cada medición entre sus terminales Fuente y Carga (IP+ e IP-). El voltaje de polarización de 5 Vcd fue aplicado entre las terminales Vcc y GND de cada uno de los sensores. Las terminales IA3 e IA7, así como las terminales IA2 e IA6, de la tarjeta de adquisición NI-USB-6008 fueron conectadas a las

terminales VIout y GND de los sensores de corriente respectivamente. La tarjeta de adquisición fue enlazada a una computadora mediante un cable USB-A/B. La Fig. 21 muestra las conexiones entre los diferentes dispositivos y equipos para la adquisición de datos tendientes al modelado y predicción de la distorsión armónica de corriente en el alimentador de la red de suministro.

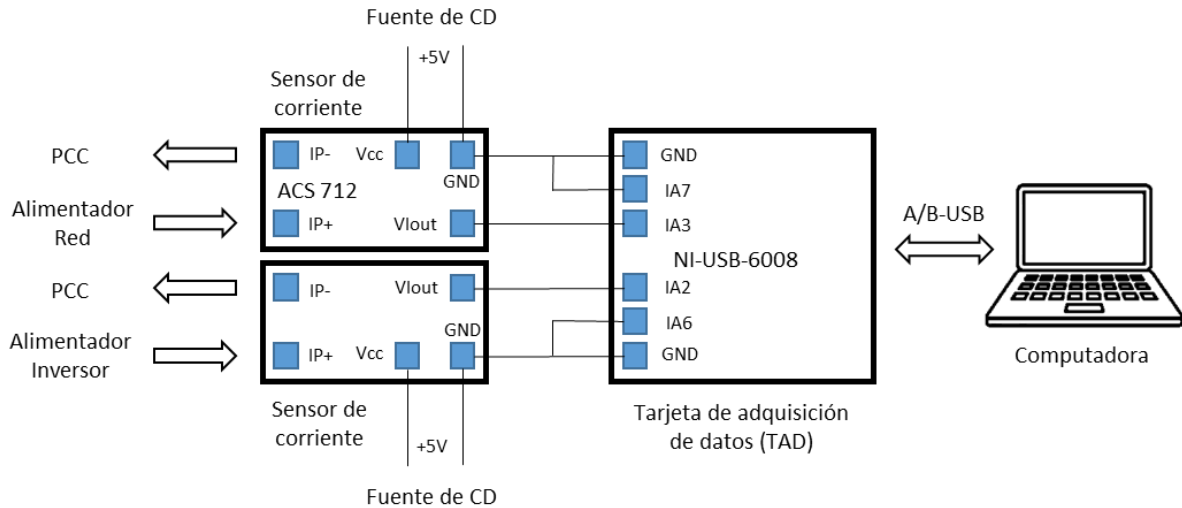
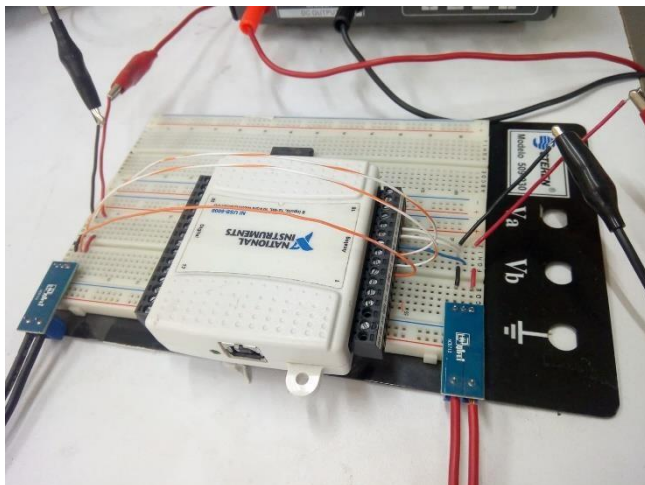


Fig. 21. Diagrama de conexión de dispositivos para la adquisición de datos utilizados en el modelado y predicción de la distorsión armónica de corriente.

En la Fig. 22 se muestran imágenes reales del sistema de adquisición de datos, donde puede observarse la conexión de los diferentes elementos como son los sensores de efecto Hall, la tarjeta de adquisición de datos y el equipo de cómputo, así como los alimentadores (de red e inversor) interceptados.



a) Conexión de los dos sensores de corriente de efecto Hall, uno en el alimentador de red y el otro en el alimentador FV (conductores rojos de la red y negros para el sistema FV); polarización con 5 volts CD de los sensores y conexiones hacia la tarjeta de adquisición de datos (de las terminales VIout y GRD de ambos sensores).

b) Conexión de la tarjeta de adquisición de datos, recibiendo la señal desde ambos sensores de corriente de efecto Hall (conductores de color azul y blancos que se conectan a las terminales IA3, IA7 y GRD para la señal de red, y conductores naranja y naranja/blancos en las terminales IA2, IA6 y GRD para la señal FV).

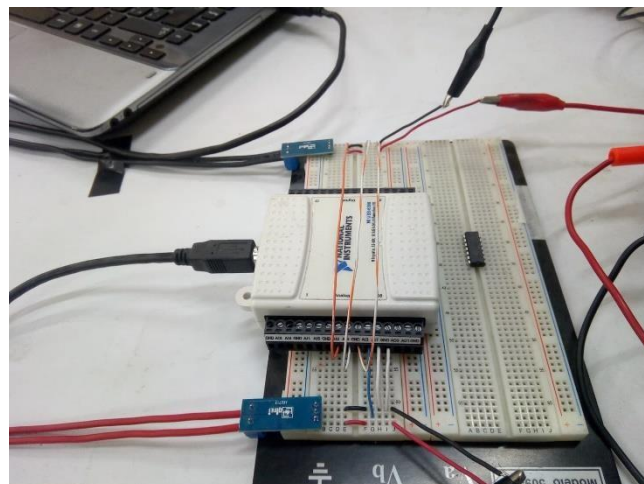


Fig. 22. Imágenes del sistema de adquisición de datos para el modelado y predicción de la corriente armónica en el alimentador de red.

Mediante el programa de cómputo SignalExpress, se llevó a cabo la recolección y procesamiento inicial de los datos capturados, siendo estos, la magnitud de la corriente en el alimentador de red sin aportaciones de potencia del sistema FV durante 5 segundos; recolectando un total de 50,000 muestras, con una tasa de muestreo de 10,000 muestras/segundo, esto con la finalidad de contar con información de referencia sobre la distorsión armónica de fondo en dicho alimentador, bajo las condiciones de operación referidas. Paso seguido, se realizó la adquisición de datos en forma simultánea de los parámetros de la corriente en ambos alimentadores (red de suministro e inversor), en el PCC, con 25,000 muestras para cada alimentador en un lapso de 5 segundos (la tasa de muestreo para las dos señales simultaneas es de 5,000 muestras/segundo debido al multiplexor utilizado por la tarjeta de adquisición). En la Tabla VI se muestran las mediciones realizadas en cada uno de los puntos a ser analizados.

Tabla VI. Descripción y condiciones de la adquisición de datos para el modelado y predicción.

ADQUISICIÓN DE DATOS		
No	Descripción	Condiciones de adquisición
1	Alimentador de la red de suministro	Sin aportación de corriente por parte del inversor y carga resistiva en el PCC
2	Alimentador de la red de suministro	Con aportación de corriente por parte del inversor y carga resistiva en el PCC

3	Alimentador de inversor	Con carga resistiva en el PCC.
---	-------------------------	--------------------------------

Con los datos adquiridos se generaron los vectores en el programa de cómputo Excel, conteniendo tiempos y magnitudes de la corriente en ambos alimentadores, en forma individual para la red de suministro sin potencia del sistema FV, y en forma simultanea cuando se integra potencia desde el sistema FV. En la Fig. 23 se muestra la representación gráfica de los vectores tiempo-magnitud de la señal de la red de suministro sin aportaciones de potencia del sistema FV.

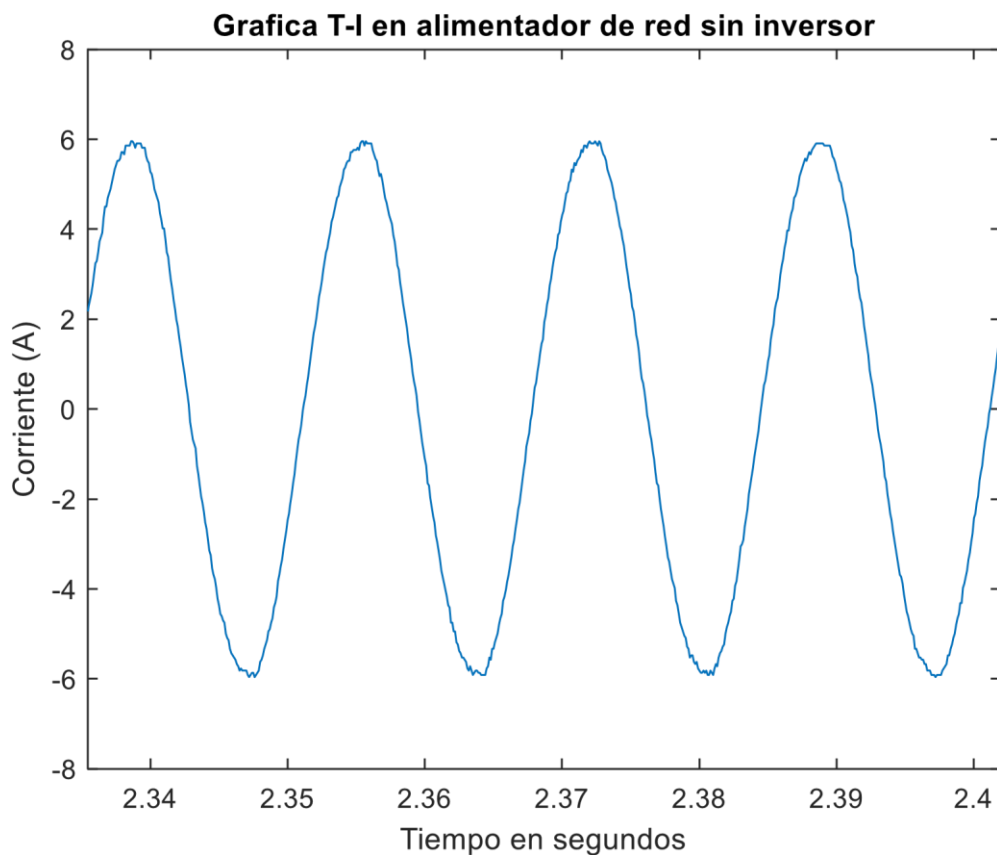


Fig. 23. Corriente en el alimentador de red sin aportaciones del sistema FV.

En la gráfica anterior se puede observar una señal de forma sinusoidal, con una magnitud pico máxima positiva de 5.98 amperes, poca distorsión armónica de fondo y un comportamiento no dinámico (invariante en el tiempo).

La Fig. 24 corresponde a la corriente en ambos alimentadores (red de suministro e inversor), alimentando en forma conjunta a la carga resistiva. En esta gráfica se observa el cambio en la forma de onda de la señal de corriente en la red de suministro ante la integración de potencia del sistema

FV mediante el inversor electrónico. Ambas señales muestran distorsión debido a la presencia de armónicos y comportamiento dinámico no lineal.

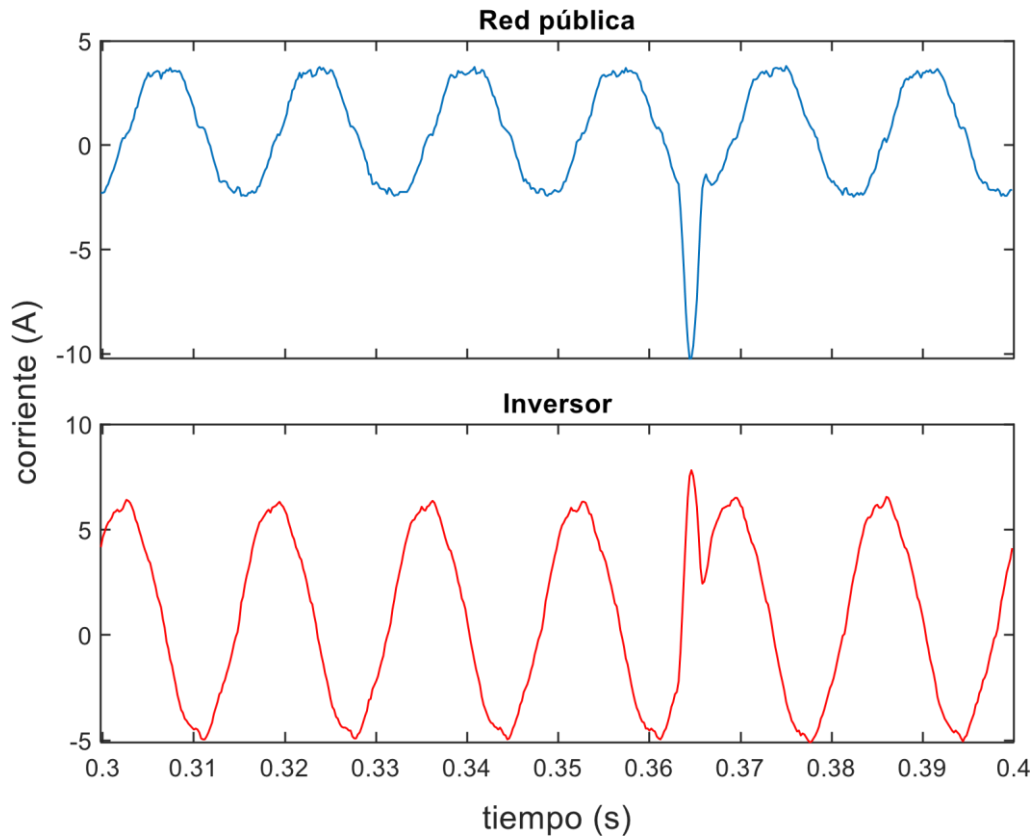


Fig. 24. Corrientes en la red de suministro y en el inversor alimentando simultáneamente carga resistiva.

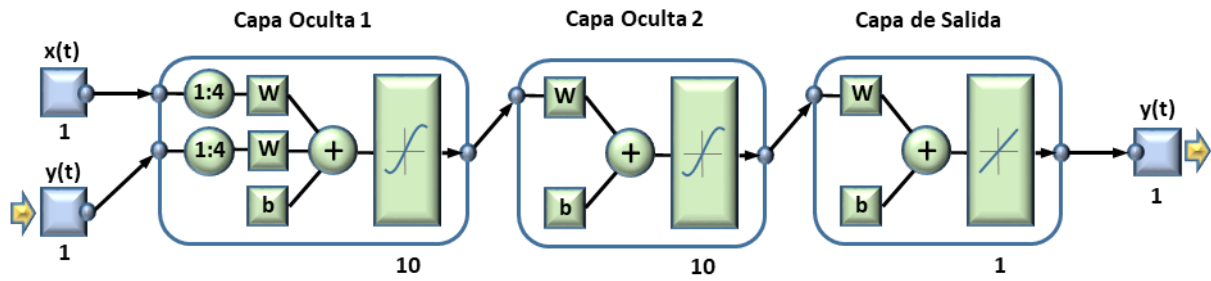
F. Modelado y Predicción del Fenómeno Armónico

El modelo propuesto al ser de naturaleza computacional, se describe mediante un algoritmo que contiene flujo de entrada, proceso y salida; donde se ingresan los datos de la corriente proveniente del inversor del lado de CA y de la red de suministro eléctrico bajo las condiciones determinadas por el diseño del experimento, y, por otro lado, se tiene como salida el pronóstico del comportamiento armónico en la red eléctrica. Para llevar a cabo esta tarea y predecir el comportamiento de un sistema dinámico no lineal, se eligió dentro del amplio repertorio de las RNA la denominada red NARX. Las redes NARX son redes dinámicas recurrentes con conexiones

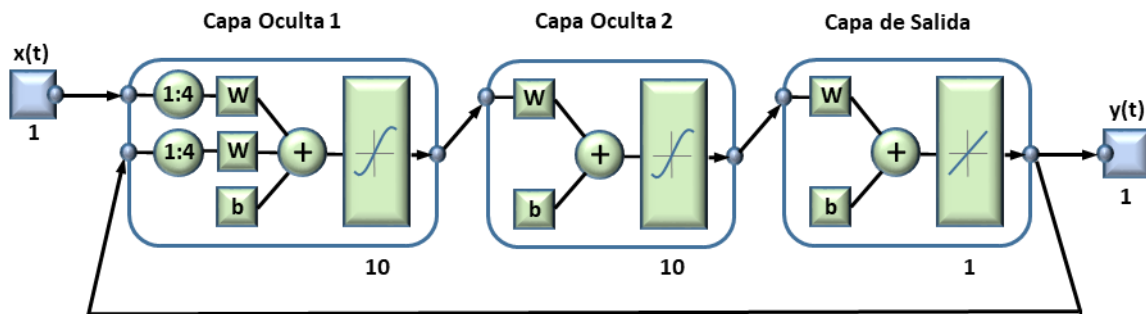
de retroalimentación, las cuales son habitualmente utilizadas para el modelado de sistemas dinámicos y predicción de series temporales [173].

Una de las características más representativas de las RNA es que no existe una arquitectura única definida para ellas; por lo que, en este trabajo en particular, las RNA que se utilizaron estuvieron configuradas con una arquitectura serie-paralelo (lazo abierto), para la red de modelado y en paralelo (lazo cerrado) para la red de predicción, la cual fue utilizada para comprobar el adecuado funcionamiento del modelo obtenido. Ambas redes estuvieron compuestas por las señales de entrada al inicio de la red, conteniendo dos capas ocultas con 10 neuronas cada una, activadas por funciones sigmoideas y una capa de salida con una sola neurona activada por una función lineal. Por otro lado, en las redes NARX, las conexiones suelen ser hacia delante, por lo que la red contó con una configuración de avance. La Fig. 25 muestra las estructuras de las redes NARX a utilizadas. En ellas se contó con cuatro desfases de las variables (señalados por la relación 1:4 en la “línea de retardo intervenida” -TDL por sus siglas en inglés-), lo que indica que las señales de entrada estuvieron conformadas por $x(t)$, $x(t-1)$, $x(t-2)$, $x(t-3)$ y $x(t-4)$ y además, se utilizaron también como variables de entrada $y(t-1)$, $y(t-2)$, $y(t-3)$ y $y(t-4)$, para la red serie-paralelo y con $z(t-1)$, $z(t-2)$, $z(t-3)$ y $z(t-4)$, para la red en paralelo, siendo “y” la salida real y “z” la salida estimada. El TDL proporcionan a su salida un número apropiado de valores pasados (en retardo), agrupados en un vector dimensional, compuesto por las señales de entrada en el momento actual, las señales de entrada anteriores, etc. El entrenamiento de las redes NARX fue de tipo supervisado, otorgándose a la red los patrones de entrada, así como la salida esperada (resultado correcto). Los vectores de entrada estuvieron conformados por vectores renglón de 1x25,000 elementos cada uno y correspondieron a las magnitudes de las corrientes en el alimentador del inversor (datos de entrada) y las magnitudes de las corrientes en la red de suministro (salida esperada). El algoritmo de Levenberg-Marquardt fue utilizado como método de entrenamiento, junto con la función de rendimiento del error medio cuadrático (mse por sus siglas en inglés), con un total de 1,000 iteraciones (épocas). El método utilizado para el cálculo de los gradientes fue la retropropagación dinámica.

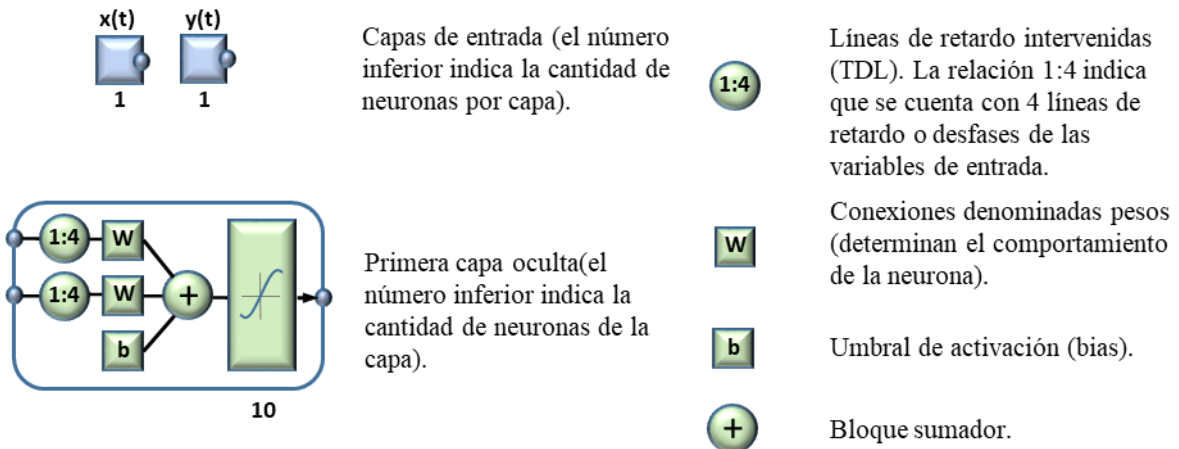
Los criterios para detener el entrenamiento estuvieron dados principalmente por el número de épocas (1,000 iteraciones), el gradiente (menor a 10^{-5}) y 6 como el número de comprobaciones de validación.



a)



b) donde:



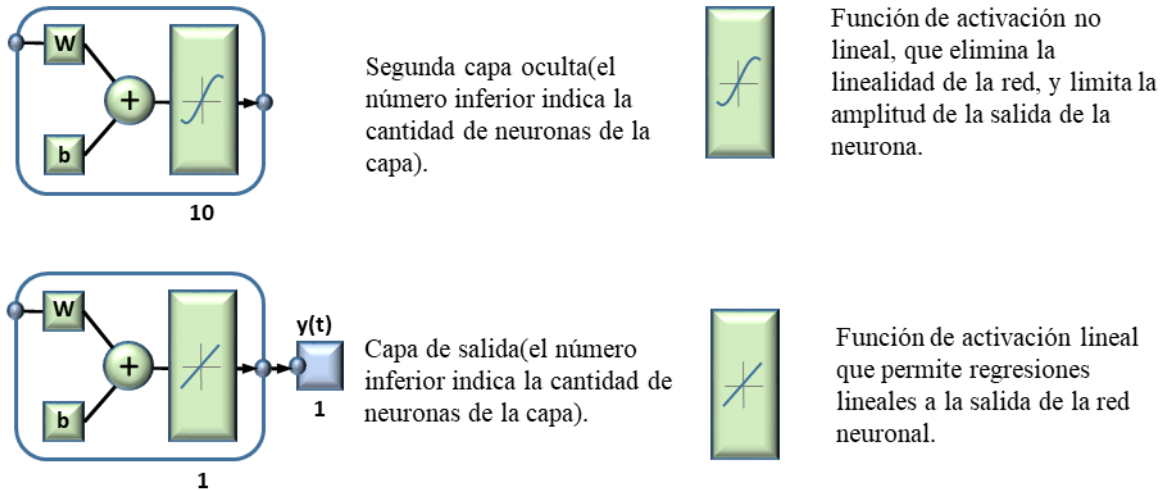


Fig. 25. Arquitectura de las redes NARX configuradas: a) Arquitectura serie-paralelo (lazo abierto). b) Arquitectura en paralelo (lazo cerrado).

El procedimiento general en ambas redes consistió en la introducción de la información de ingreso (donde se activan las neuronas de entrada), después se propagó la información a través de las redes, generándose las salidas. Posteriormente, las salidas de las redes fueron comparadas con las salidas deseadas y se calcularon los errores; finalmente se hicieron correcciones en los pesos que se basaron en dichos errores hasta que se logró minimizarlos. Durante el entrenamiento el conjunto de datos fue dividido en forma aleatoria (para eliminar efecto de sobreajuste), en tres subconjuntos para cada red. El primer subconjunto fue el de entrenamiento, con este grupo de datos se llevó a cabo el aprendizaje de la red por medio del ajuste de los pesos y corresponden al 70% del total de los datos. El segundo subconjunto (con el 15% de los datos), fue el grupo de validación, el cual sirvió para monitorear el error durante el proceso de entrenamiento. El último subconjunto con el restante 15% de los datos, fue el grupo de prueba, éste no fue usado durante el entrenamiento, pero fue utilizado posteriormente para evaluar el desempeño de las redes.

Al término de la configuración de las redes, se llevó a cabo la ejecución de los algoritmos generados a través de la caja de herramientas de aprendizaje profundo de Matlab, con lo que se obtuvieron los resultados finales del modelado para el entrenamiento y la red neuronal para la predicción. A continuación, se muestra la programación del algoritmo y la ventana de ejecución del algoritmo junto con la arquitectura de las redes neuronales serie-paralelo y paralelo (Fig. 25a).

Redes Neuronales No-lineales, Auto-regresivas con entradas eXternas (NARX)

(para modelar un sistema dinámico con contenido armónico)

Carga y verificación gráfica de los datos

```
clear clc
[NUMCFE, TXTCFE,
RAWCFE]=xlsread('C:\Users\ALBERTO\Documents\DOCTORADO\RN1\IC.xlsx','CFE','B1:B25001'); % Carga datos de la red eléctrica
[NUMINV, TXTINV,
AWINV]=xlsread('C:\Users\ALBERTO\Documents\DOCTORADO\RN1\IC.xlsx','INVERSOR','B1:B25001'); % Carga datos del Inversor Fs=5000;
% Frecuencia de muestreo
ti=0:1:length(NUMCFE)-1;% Vector de tiempo
figure
plot(ti,NUMCFE) % Grafica la señal de la red eléctrica
title('datos de RED en msegundos') % Etiqueta figure
plot(ti,NUMINV) % Grafica la señal del Inversor title('datos del INVERSOR en msegundos') % Etiqueta
```

Cambio de formato y asignación de variables

```
cell_INV = num2cell(NUMINV'); % Conversión del tipo de datos del inversor
cell_CFE = num2cell(NUMCFE'); % Conversión del tipo de datos de la red x=
cell_INV; % Asignación de variables datos inversor t= cell_CFE; % Asignación de variables datos red
size(x) % Muestra el tamaño de las variables de trabajo inversor
ans = 1x2
    1    25000
size(t) % Muestra el tamaño de las variables de trabajo inversor ans
= 1x2
    1    25000
```

Definición de pesos

```
setdemorandstream(491218381) % asigna valores de inicio a los pesos
```

Modelado inicial de la red neuronal

```
HS= [10 10]; % Declaración de numero de neuronas para cada capa oculta (2) net =
narxnet(1:4,1:4,HS); % Parámetros: retraso entrada, retraso objetivo, No.
neuronas en capa oculta
view(net) % Muestra la arquitectura de la red
```

```
[Xs,Xi,Ai,Ts] = preparets(net,x,{},t); % Prepara datos de series temporales de
entrada y de objetivo(Neural Network, datos de entrada sin retroalimentación,
objetivos sin retroalimentación, objetivos de salida [net,tr] =
train(net,Xs,Ts,Xi,Ai); % Entrenamiento de red Nntraintool % Ventana de
entrenamiento view(net) % Muestra la arquitectura de la red
```

El rendimiento de entrenamiento, validación y prueba

```
plotperform(tr) % Grafica el rendimiento en términos del error cuadrático
```

Analizando la eficiencia de la red neuronal

```
Y = net(Xs,Xi,Ai); % Asignación de variables
perf = mse(net,Ts,Y) % Mide el error cuadrático medio de la red neuronal entrenada
para todos los pasos de tiempo
plotresponse(Ts,Y) % Muestra la respuesta de la red en comparación con la salida
deseada
```

Autocorrelación Error-Tiempo

```
E = gsubtract (Ts, Y); % Resta ambas matrices
ploterrcorr (E) % Muestra la correlación de error en el tiempo t, e(t)
```

Autocorrelación Error-Entrada

```
plotinerrcorr (Xs, E) % Muestra la correlación de error con respecto a las
entradas, con diversos grados de retraso
```

Comparación Modelo contra Objetivo

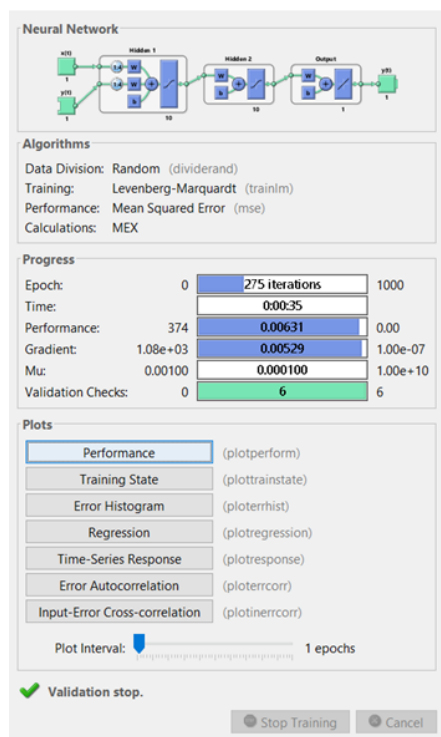
```
y1 = y; % Reasignación de variables u1
= u; % Reasignación de variables
[p1,Pi1,Ai1,t1] = preparets(narx_net,u1,{},y1); % Asignación de atributos
yp1 = narx_net(p1,Pi1,Ai1); % Asignación de variables de atributos TS =
size(t1,2); % Delimitación de escalas
plot(1:TS,cell2mat(t1),'b',1:TS,cell2mat(yp1),'r') % Grafica comparación modelo
vs objetivo xlabel('Flujo de datos de salida') % Etiqueta ylabel('Corriente
Eléctrica (A)') % Etiqueta title('Modelo vs Objetivo') % Etiqueta
rendimiento = mse(narx_net, t1, yp1 ) % Calcula el mse
```

Comparación Predicción contra Objetivo

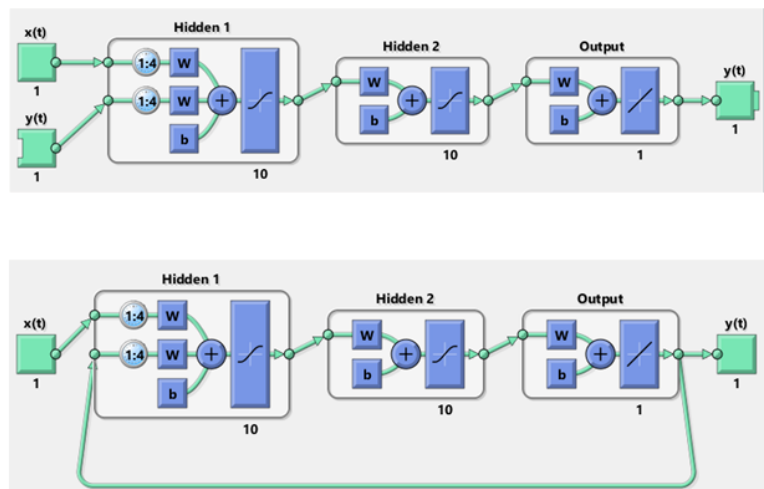
```

y2 = y; % Reasignación de variables u2
= u; % Reasignación de variables
[p2,Pi2,Ai2,t1] = preparets(narx_net_closed,u2,{},y2); % Asignación de atributos
yp2 = narx_net_closed(p2,Pi2,Ai2); % Asignación de variables de atributos TS =
size(t1,2); % Delimitación de escalas
plot(1:TS,cell2mat(t1),'b',1:TS,cell2mat(yp2),'k') % Grafica predicción vs
objetivo
xlabel('Output data stream') % Etiqueta ylabel('Electric
Current (A)') % Etiqueta title('Prediction vs Target') %
Etiqueta
rendimiento = mse(narx_net_closed, t1, yp2 ) % Calcula el mse

```



a)



b) y c)

Fig. 25a. a) Ventana de ejecución del algoritmo en Matlab. b) Arquitectura serie-paralelo (lazo abierto). c) Arquitectura en paralelo (lazo cerrado); entregadas ambas por Matlab.

VII. RESULTADOS

Al aplicar la metodología establecida para caracterizar el comportamiento armónico de corriente en la red eléctrica, cuando esta recibe generación proveniente de un sistema FV a través de inversores electrónicos de potencia, se consideró primeramente un análisis con la señal de corriente sin aportaciones provenientes del inversor, y luego integrando generación FV en el PCC.

Mediante la aplicación de algoritmos computacionales en el entorno Matlab, fueron analizados 5 segundos de la señal a una frecuencia de muestreo de 10,000 muestras por segundo, capturando un total de 50,000 muestras. En la Fig. 26 se grafican 0.055 segundos de la señal de corriente en el lado de la red, cuando es alimentada una carga puramente resistiva de 30 ohms a 127 volts, que demanda 4.2 amperes eficaces de la red.

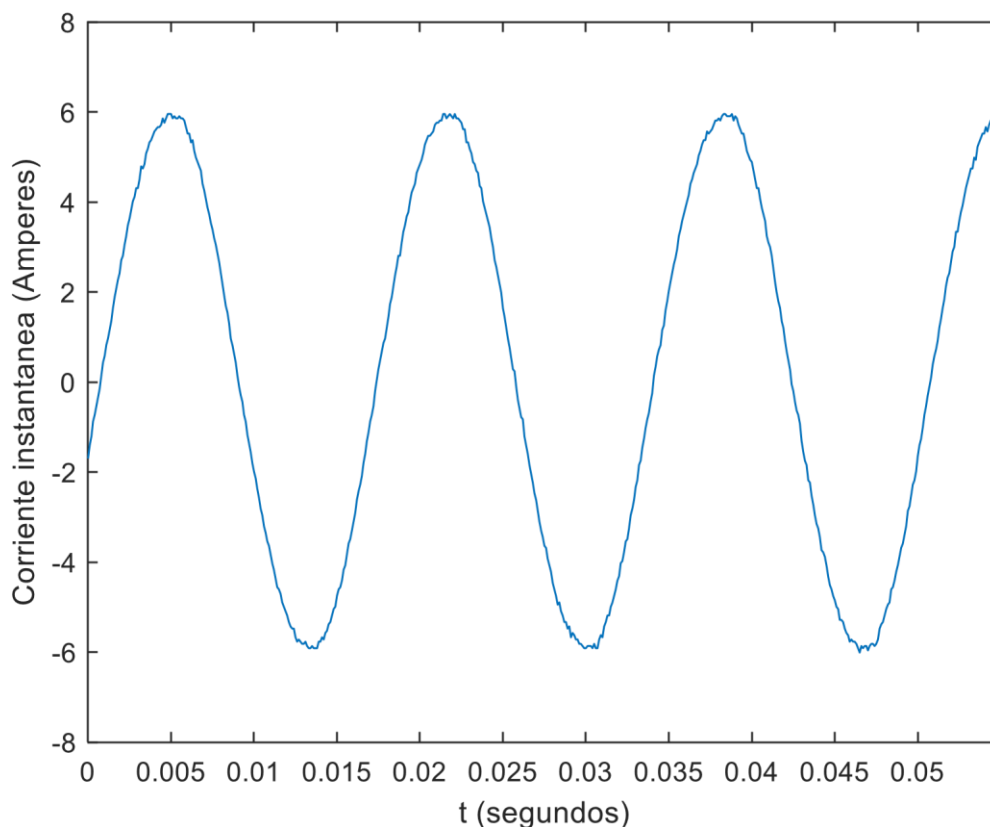


Fig. 26. Señal de corriente en el lado de la red de suministro sin aportaciones del inversor.

En esta gráfica se observa una señal sinusoidal con un valor pico de corriente de 6.05 amperes y un valor eficaz de 4.27 amperes, con una ligera distorsión armónica de fondo (debido a otras cargas no lineales conectadas a la red), con un valor de THDi de 1.07 %.

Primeramente, se aplicaron herramientas estadísticas para obtener una visión rápida del comportamiento de la señal. El histograma de la Fig. 27 muestra la disposición de los valores

instantáneos de corriente; la distribución asimétrica de las frecuencias en los extremos con respecto a cero, refleja la presencia de CD en el sistema (al observarse mayores valores de frecuencias positivas acumuladas). Además, la presencia de componentes armónicas impares es determinada por la similitud derecha-izquierda de las frecuencias con respecto al valor central (0), todo esto debido a la distorsión de fondo contenida en la red.

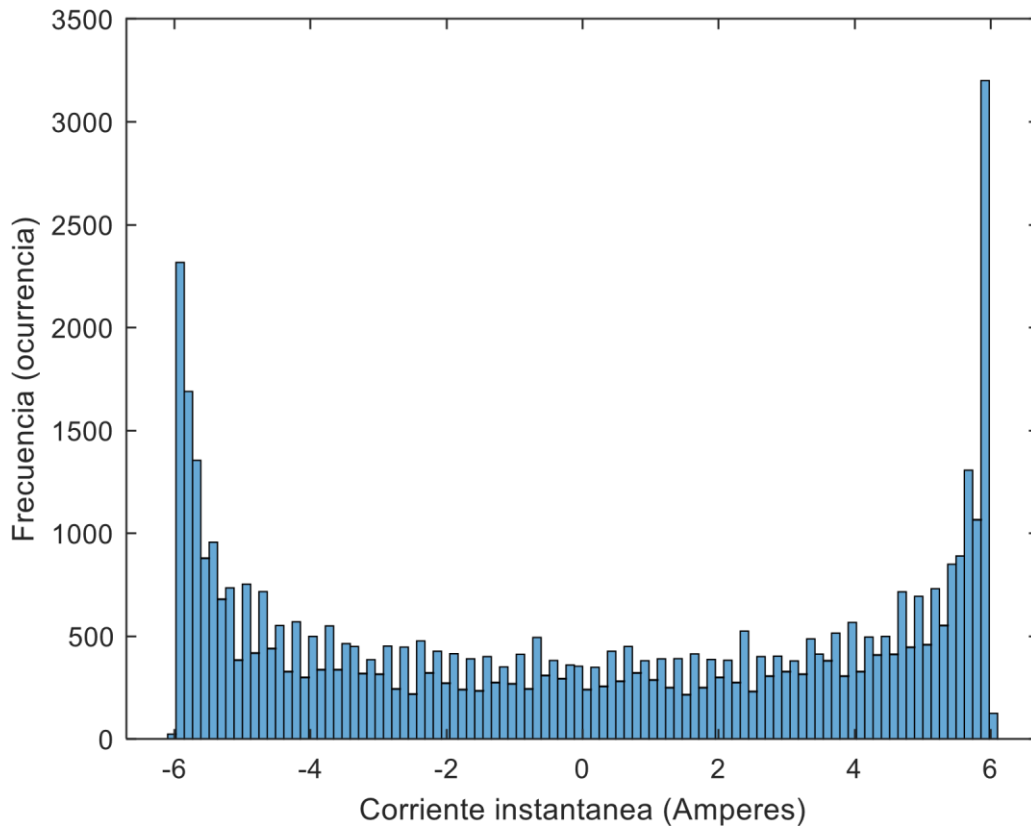


Fig. 27. Histograma de la señal de corriente en el lado de la red de suministro sin aportaciones del inversor.

Aplicando el diagrama de caja y bigotes, se obtuvieron los resultados mostrados en la Fig. 28. Aquí podemos ver que el primer y tercer cuartil están cargados a un valor muy cercano a los valores eficaces de la señal de corriente, con bigotes simétricos; esto prueba que los datos están distribuidos equitativamente, ya que no muestran valores atípicos y su mediana corresponde a un valor muy cercano a cero (-4.7619×10^{-6} amperes).

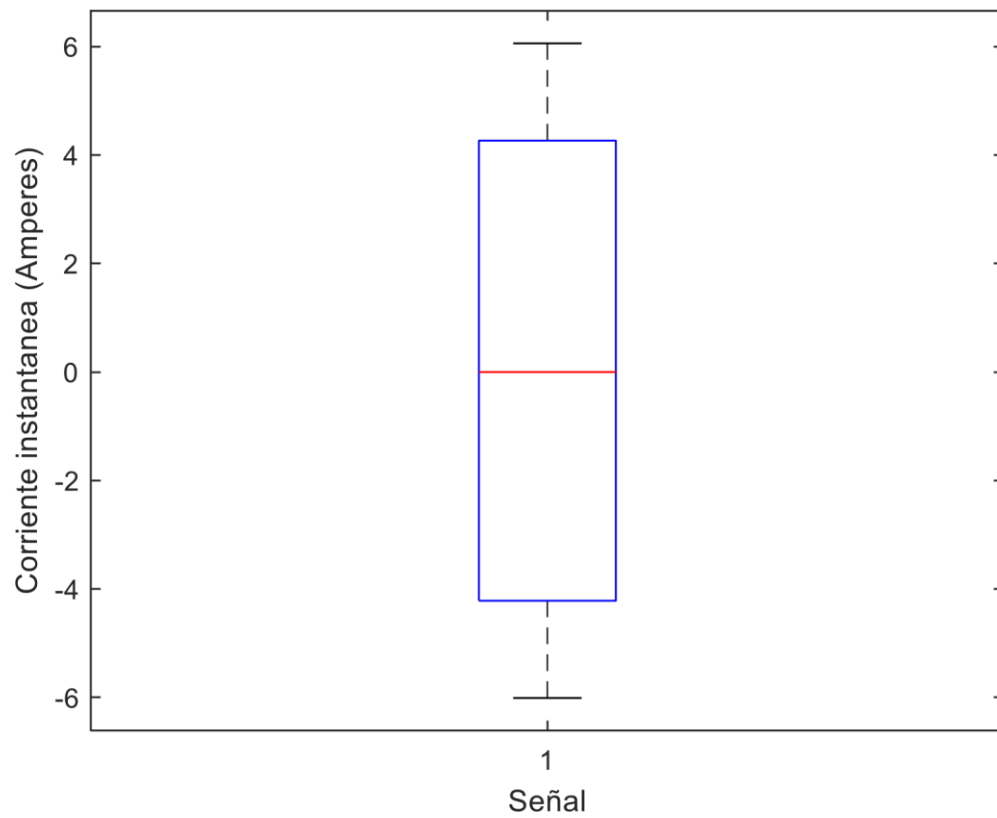


Fig. 28. Gráfico de caja y bigotes de la señal de corriente en el lado de la red de suministro sin aportaciones del inversor.

Para el análisis frecuencial y caracterización de la distorsión armónica de fondo, se aplicó la FFT. En la Fig. 29 se observa el espectro (frecuencia-amplitud) de la señal de corriente analizada.

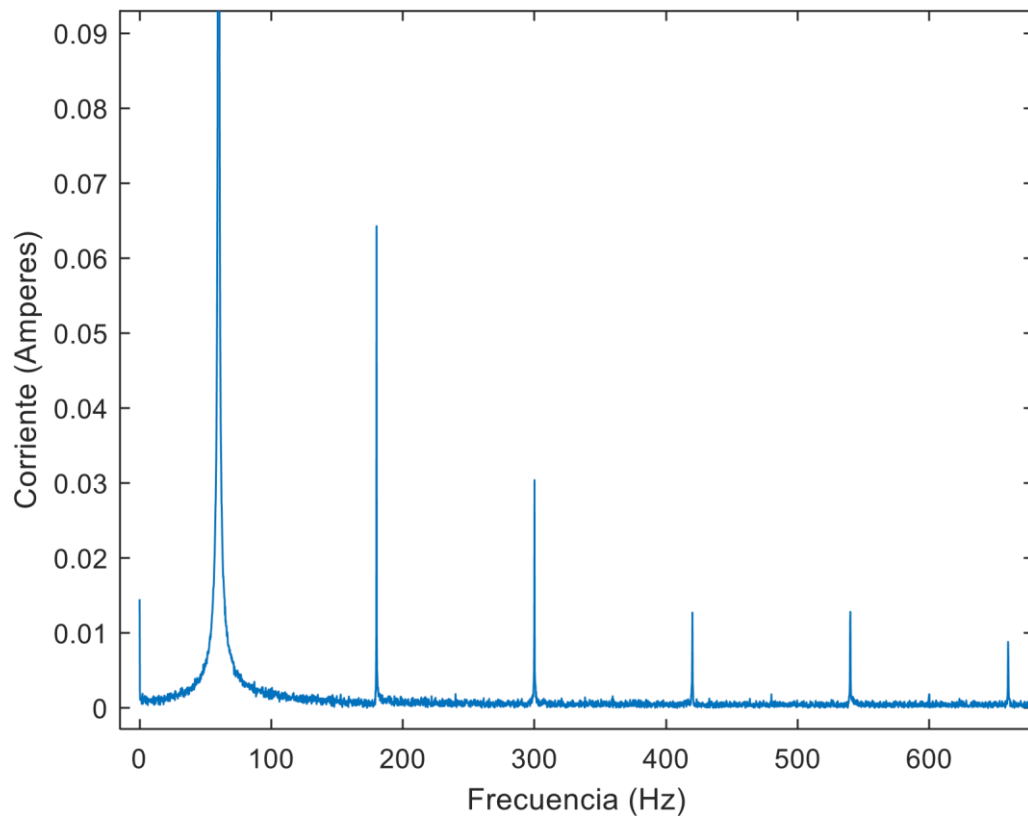


Fig. 29. Espectro en frecuencia de la señal de corriente en el lado de la red de suministro sin aportaciones del inversor.

En esta gráfica se muestra el predominio de la frecuencia de 60 Hz (frecuencia fundamental), con bajas aportaciones de la tercera, quinta, séptima, novena y décimo primera armónica (armónicas más representativas), así como también baja contribución de CD. La Tabla VII muestra los valores de las aportaciones de las armónicas presentes.

Tabla VII. Armónicas de la señal de corriente en la red de suministro sin aportaciones del inversor.

i-esima armónica	Descripción	Frecuencia (Hz)	Corriente pico (Amperes)	Corriente eficaz (Amperes)
0	Componente de CD	0	0.014	0.014
1	Fundamental	60	3.141	2.221
3	Tercera armónica	180	0.064	0.045
5	Quinta armónica	300	0.030	0.021
7	Séptima armónica	420	0.012	0.008
9	Novena armónica	540	0.011	0.007
11	Décimo primera armónica	660	0.008	0.005

Utilizando la STFT, se obtuvo el comportamiento de las frecuencias armónicas presentes con respecto al tiempo. En la Fig. 30 se pueden observar barras horizontales de color amarillo que acentúan la frecuencia fundamental y las armónicas presentes, denotando continuidad, periodicidad e invariabilidad en el tiempo con respecto a su contenido espectral de la señal.

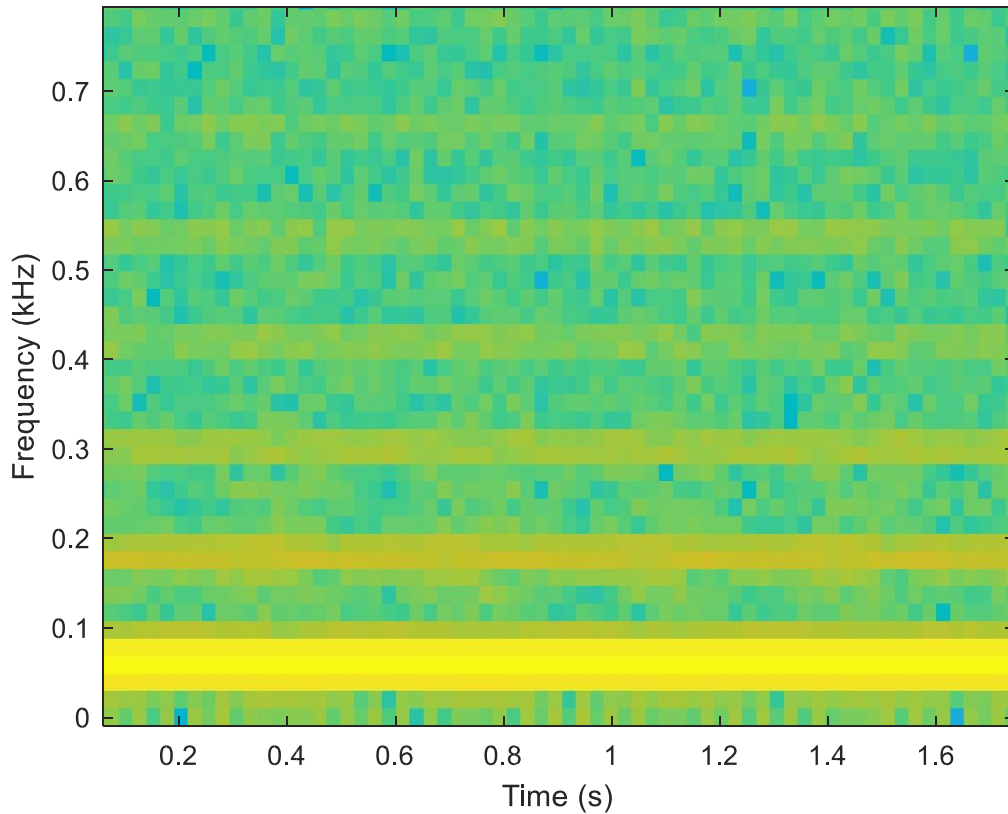


Fig. 30. Espectrograma de la señal de corriente en el lado de la red de suministro sin aportaciones del inversor.

Utilizando la CWT con una onda tipo morse, se pudo validar que la señal analizada en el lado de la red de suministro sin inversor mediante la STFT se comporta en forma continua, con baja presencia de armónicas y sin cambios en su contenido espectral. En la Fig. 31 se representa un escalograma de 5 segundos de muestreo, observándose mediante las barras horizontales de color amarillo la frecuencia fundamental de 60 Hz, y tenues barras también horizontales de color azul claro que representan la tercera y la quinta armónica.

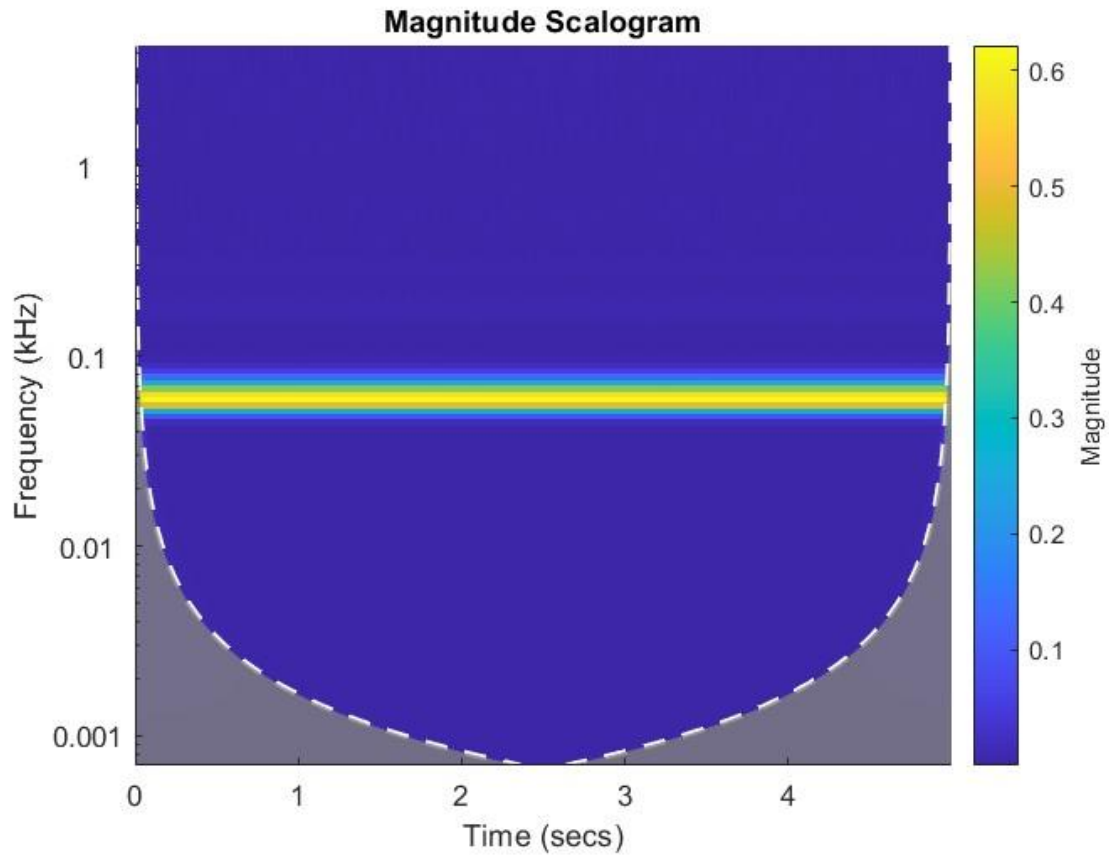


Fig. 31. Escalograma de la señal de corriente en la red de suministro sin aportaciones del inversor.

En segundo lugar, se integraron 1,500 Wp de potencia del sistema FV en el PCC (nodo de integración) mediante el inversor central, alimentando a la misma carga resistiva. En esta etapa se analizaron nuevamente la señal en el alimentador de red mediante una lectura de 5 segundos (50,000 muestras en total). La Fig. 32 representa 0.055 segundos de la señal de corriente.

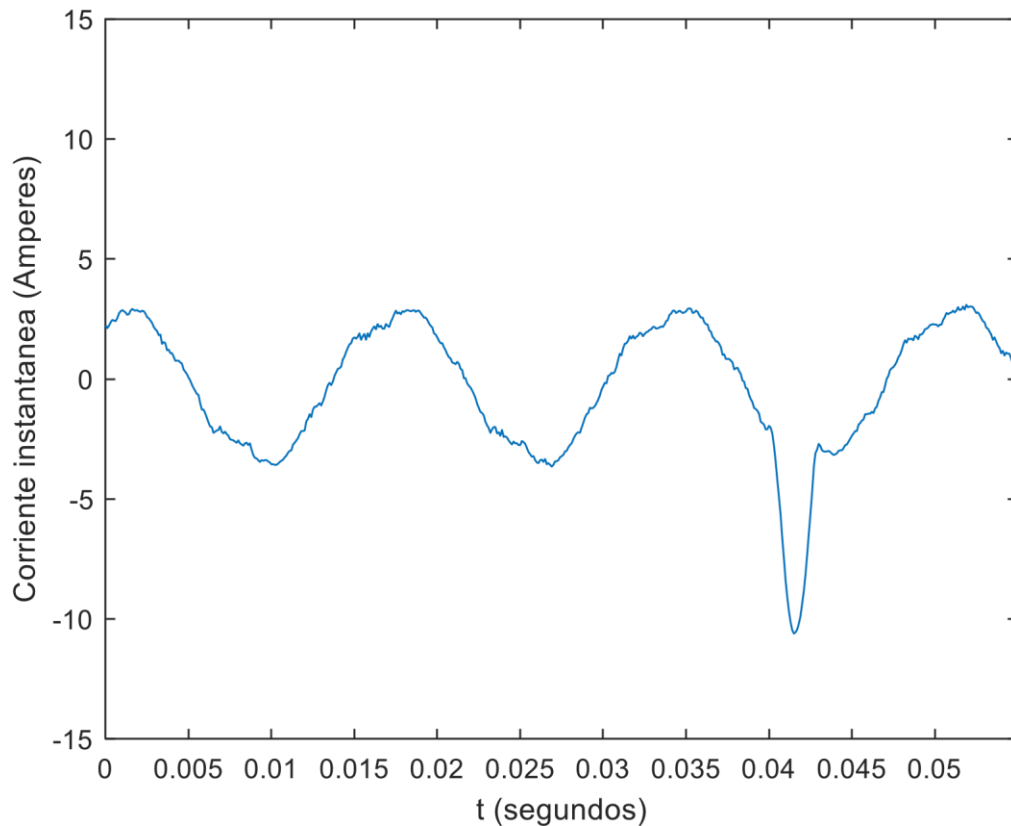


Fig. 32. Señal de corriente en el lado de la red de suministro con aportaciones del inversor.

En la Fig. 32 se puede observar que la forma de onda de corriente es diferente a la mostrada en la Fig. 26, resultando una versión distorsionada de la onda sinusoidal. Aquí se puede apreciar un transitorio impulsivo de corriente con un valor instantáneo de -10.81 amperes; este comportamiento se repite a intervalos de 1 segundo, y es otro de los efectos provocados por el funcionamiento del inversor. Los valores instantáneos máximos positivos son menores que la señal sin la aportación del inversor (3.28 amperes eficaces), esto es debido a la aportación de potencia activa del sistema FV.

Analizando el histograma de la Fig. 33, se observa un comportamiento asimétrico de las corrientes instantáneas y el de sus frecuencias alrededor del valor cero, debido a la distorsión de la onda de corriente provocada por la presencia de armónicos pares e impares, así como un offset de CD. Por otra parte, existen datos atípicos lejos de del grupo principal.

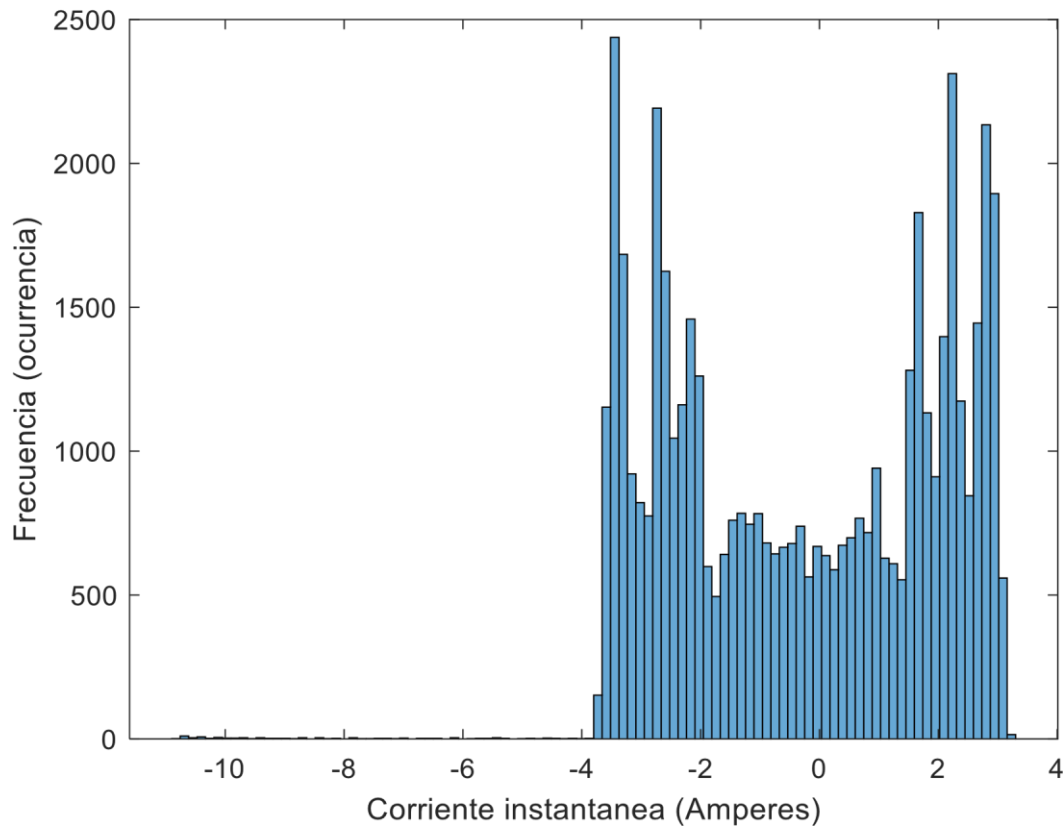


Fig. 33. Histograma de la señal de corriente en el lado de la red de suministro con aportaciones del inversor.

Reforzando el análisis anterior, la Fig. 34 de la misma señal, mostró que los bigotes no son simétricos, siendo más cortos sobre del tercer cuartil; esto significa que la mayoría de los datos se cargan hacia la derecha del histograma. Este comportamiento se deriva por la presencia de datos atípicos, los cuales también se observan en la Fig. 34 (un total de 49 datos atípicos fueron encontrados en la muestra). Estos datos atípicos representan los transitorios impulsivos de corriente observados en la Fig. 32.

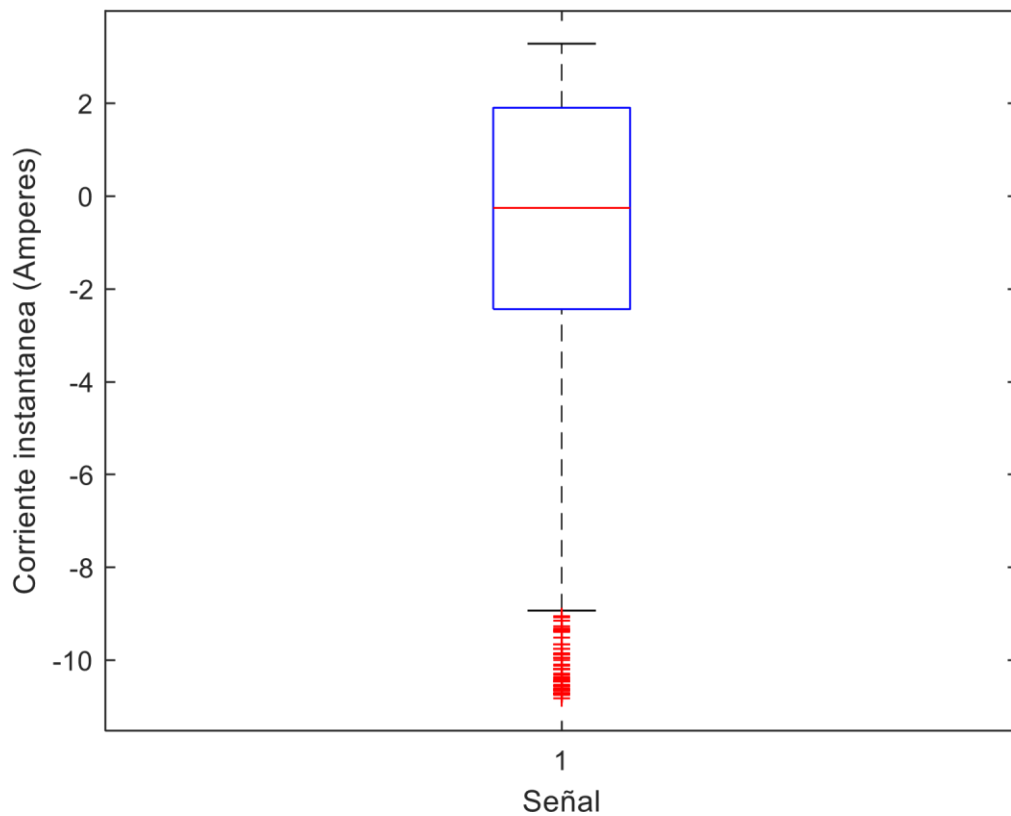


Fig. 34. Gráfico de caja y bigotes de la señal de corriente en el lado de la red de suministro con aportaciones inversor.

Nuevamente, la distorsión de la forma de onda fue evidenciada con la FFT. La Fig. 35 muestra el espectro de la señal (frecuencia-amplitud) de corriente. En esta figura se observa un aumento de componentes armónicas en la señal muestreada. De nuevo tenemos la presencia de la componente fundamental de 60 Hz, las armónicas de orden impar y par, así como la componente de CD. Otro aspecto importante es la presencia de interarmónicas y subarmónicas en la señal, en un ancho de banda de 600 Hz. En la Tabla VIII se muestran los valores de las aportaciones de las armónicas presentes, enfatizando un mayor contenido armónico en comparación con el de la señal de corriente sin aportaciones de potencia del sistema FV.

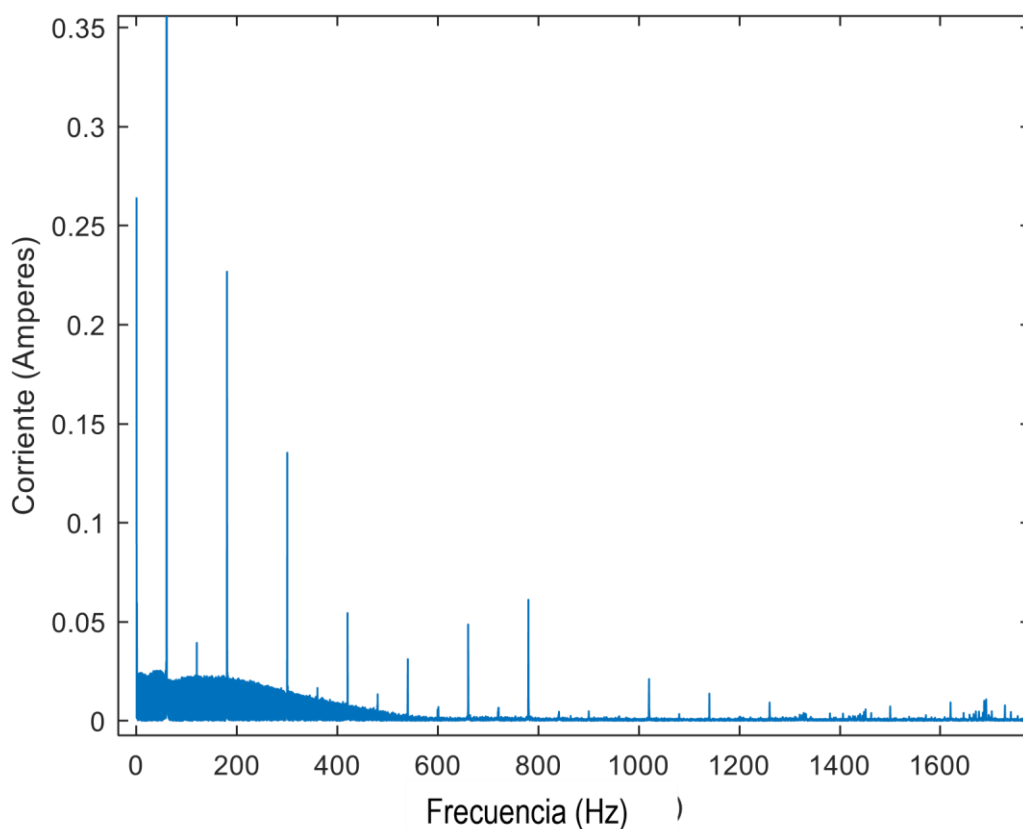


Fig. 35. Espectro en frecuencia de la señal de corriente en el lado de la red de suministro con aportaciones del inversor.

Tabla VIII. Armónicas de la señal de corriente en la red de suministro con aportaciones del inversor.

i-esima armónica	Descripción	Frecuencia (Hz)	Corriente pico (Amperes)	Corriente eficaz (Amperes)
0	Componente de CD	0	0.264	0.264
1	Fundamental	60	3.141	2.221
2	Segunda armónica	120	0.039	0.027
3	Tercera armónica	180	0.226	0.159
5	Quinta armónica	300	0.135	0.095
6	Sexta armónica	360	0.016	0.011
7	Séptima armónica	420	0.054	0.038
8	Octava armónica	480	0.013	0.009
9	Novena armónica	540	0.031	0.021
11	Décima primer armónica	660	0.048	0.033
13	Décima tercer armónica	780	0.061	0.043
17	Décima séptima armónica	1020	0.021	0.014
19	Décima novena armónica	1140	0.013	0.009
21	Vigésima primer	1260	0.009	0.006

Aplicando la STFT, se pudo confirmar que su contenido frecuencial no cambia en el tiempo. En la Fig. 36 se muestran 3.25 segundos de la señal procesada, donde se observa regularidad en el contenido de las armónicas (barras horizontales de color amarillo). Además, se muestra el espectro de los transitorios de corriente espaciados simétricamente en el tiempo, generados por el inversor (barras verticales de color amarillo espaciadas a intervalos de 1 segundo).

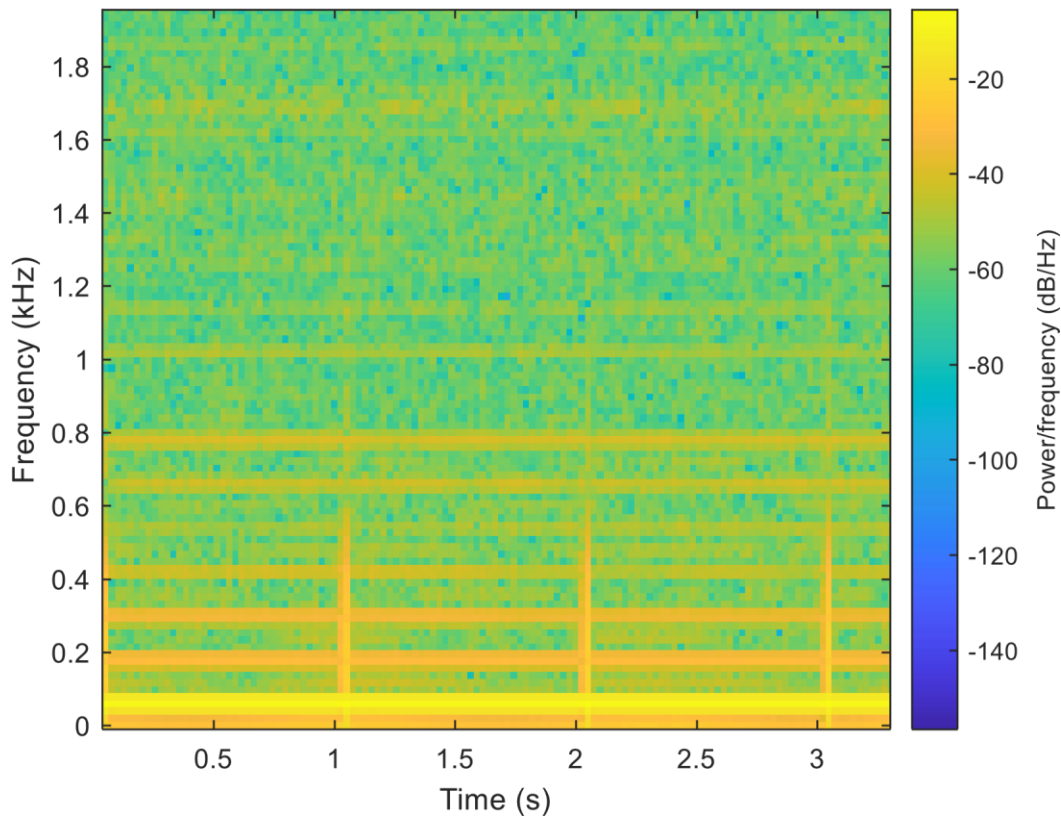


Fig. 36. Espectrograma de la señal de corriente en el lado de la red de suministro con aportaciones del inversor.

Validando el análisis espectral anterior, la Fig. 37 muestra la aplicación de la CWT utilizando nuevamente una onda morse. En ella se distingue la frecuencia fundamental marcada por una barra de color amarillo en forma horizontal, así como los transitorios de corriente generados por el funcionamiento del inversor, los cuales aparecen espaciados a intervalos de 1 segundo. Barras horizontales de color azul claro revelan la presencia de las armónicas tercera, quinta, séptima y décimo primera.

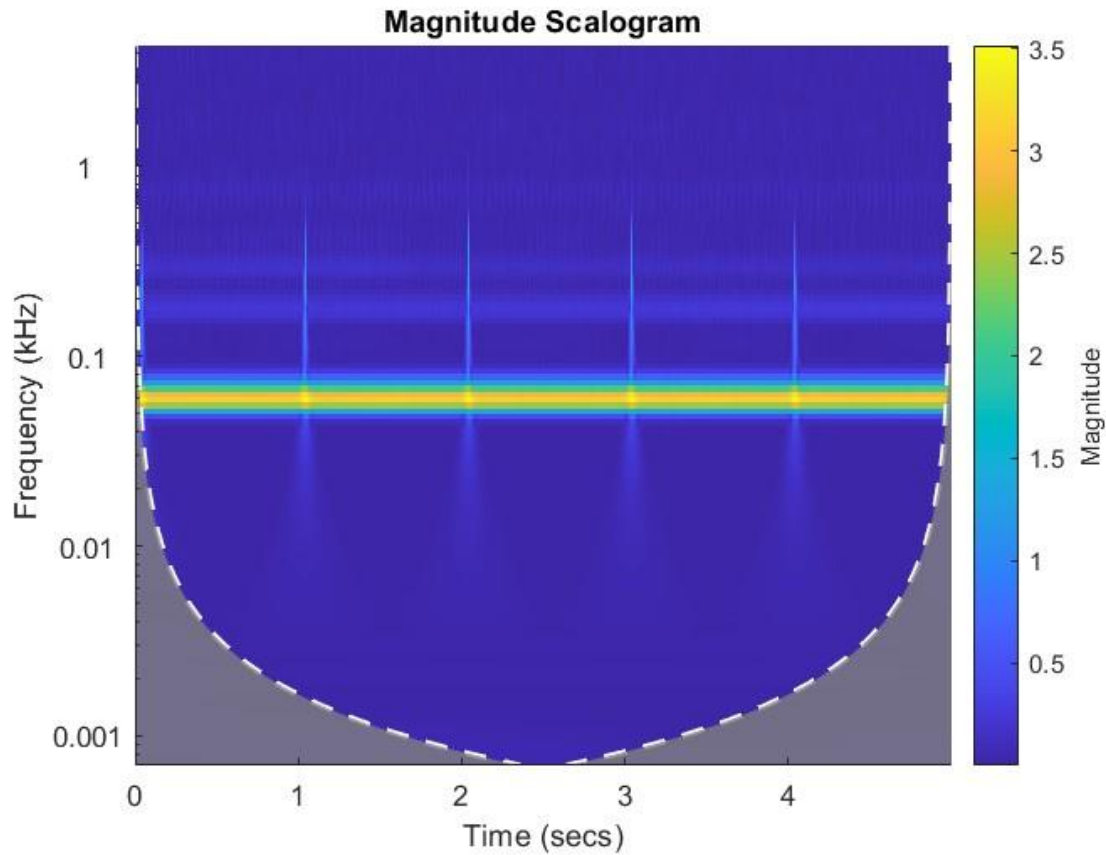


Fig. 37. Escalograma de la señal de corriente en la red de suministro con aportaciones del inversor.

Ya concluido el análisis frecuencial de las corrientes en la red, se procedió al modelado y predicción del comportamiento armónico. Primeramente y una vez parametrizada la red NARX serie-paralelo, se realizó al entrenamiento mediante el método de Levenberg-Marquardt, utilizando únicamente 269 iteraciones de las 1000 épocas disponibles para obtener el valor de rendimiento más bajo antes de la detención del algoritmo, esto debido a que 6 o más veces no hubo cambios en dicho rendimiento durante la comprobación con datos de validación. En la Fig. 38 se puede observar una caída muy rápida del mse antes de las 10 iteraciones.

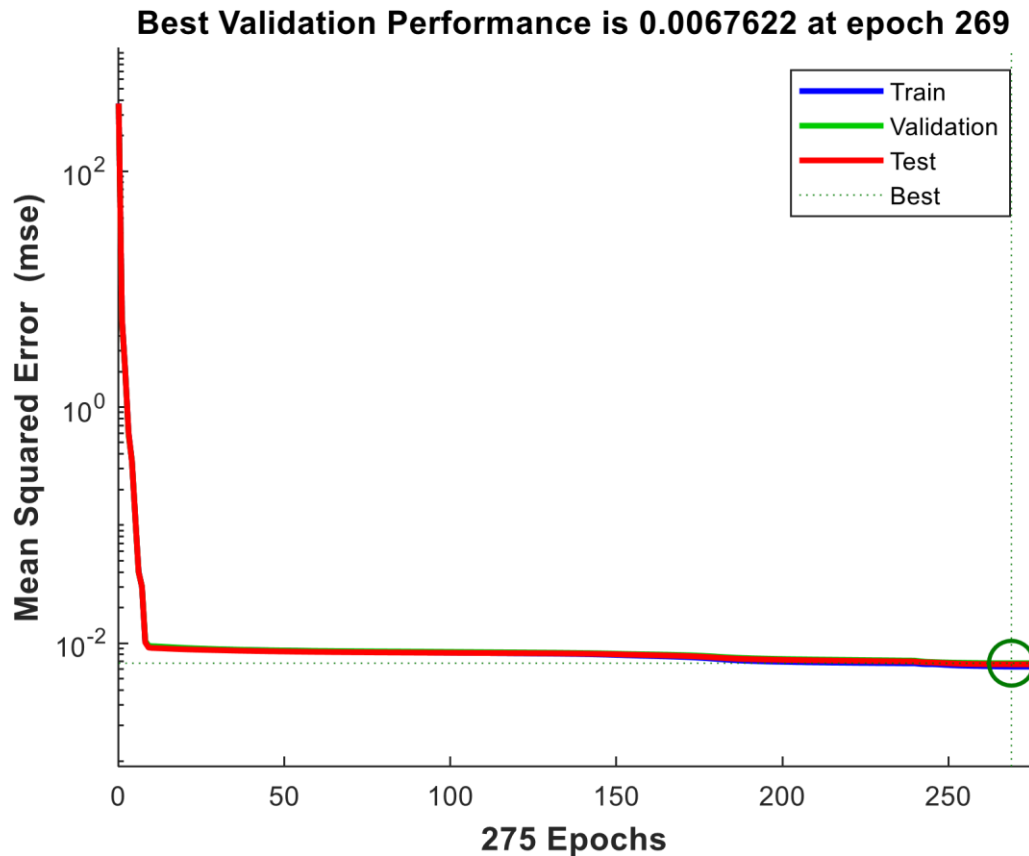


Fig. 38. Desarrollo del entrenamiento, validación y prueba con referencia al número de iteraciones utilizadas y mse obtenido.

En la gráfica superior se observa como los errores de los conjuntos de entrenamiento, validación y prueba siguen tendencias similares durante la ejecución del algoritmo, alcanzando finalmente un valor del mse menor al 10^{-2} , además, nos muestra el valor mínimo del rendimiento de la red obtenido en la iteración 269, que fue de 0.0067622.

El histograma de los errores en los tres conjuntos de datos se muestra en la Fig. 39, en él se observa que, en la línea central, es decir cuando el error es cero, la proporción de datos del conjunto de entrenamiento es mayor, y esta tendencia es constante a medida que estudiamos datos más alejados del error nulo, manteniéndose siempre mayor en referencia a los datos de validación y prueba. Esta tendencia es acorde al comportamiento de los datos mostrado en la Fig. 38.

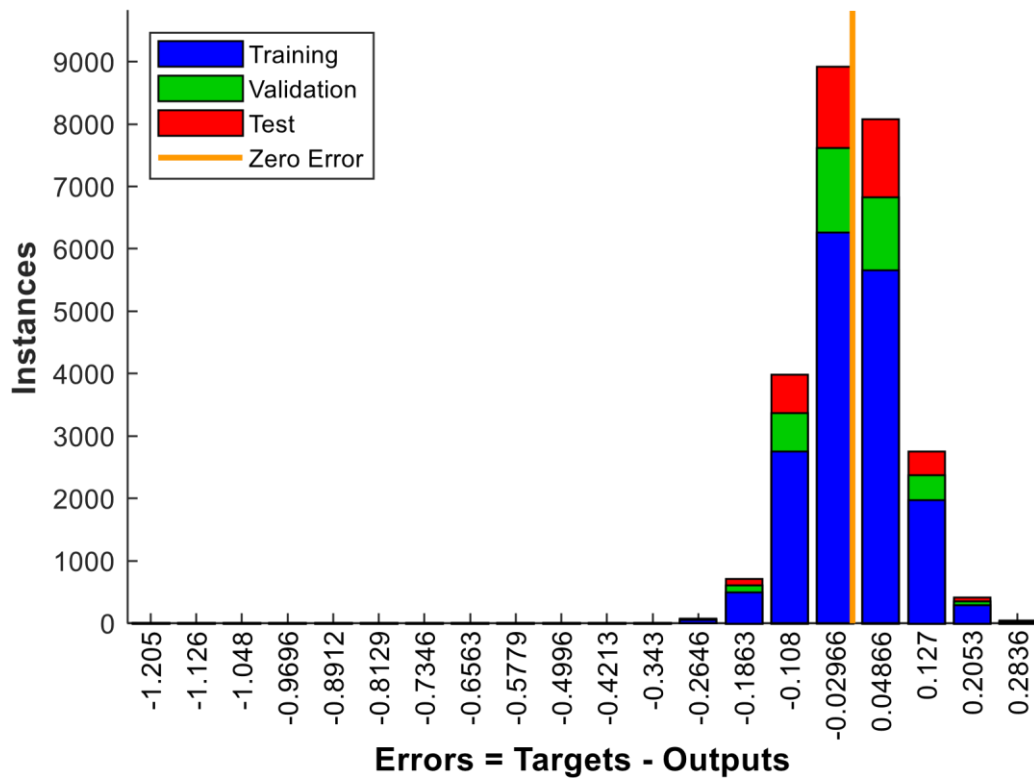


Fig. 39. Histograma del error de las salidas comparado con el objetivo.

Otra forma de observar los datos con errores significativos fueron las regresiones lineales de cada conjunto de datos (entrenamiento, validación y prueba). En la Fig. 40 se puede observar como aquellos valores con mayor diferencia entre la salida obtenida y los objetivos buscados (línea recta), se encontraron distantes del ajuste lineal perfecto; siendo el mejor escenario el de los datos de entrenamiento con un 99.938% de efectividad en la regresión. Este resultado pudo ser adjudicado a la mayor cantidad de datos (70% del total de datos) con los que el entrenamiento es llevado a cabo, pero cabe mencionar la proximidad presentada con respecto a los otros grupos de datos en lo que se refiere a la efectividad de la regresión.

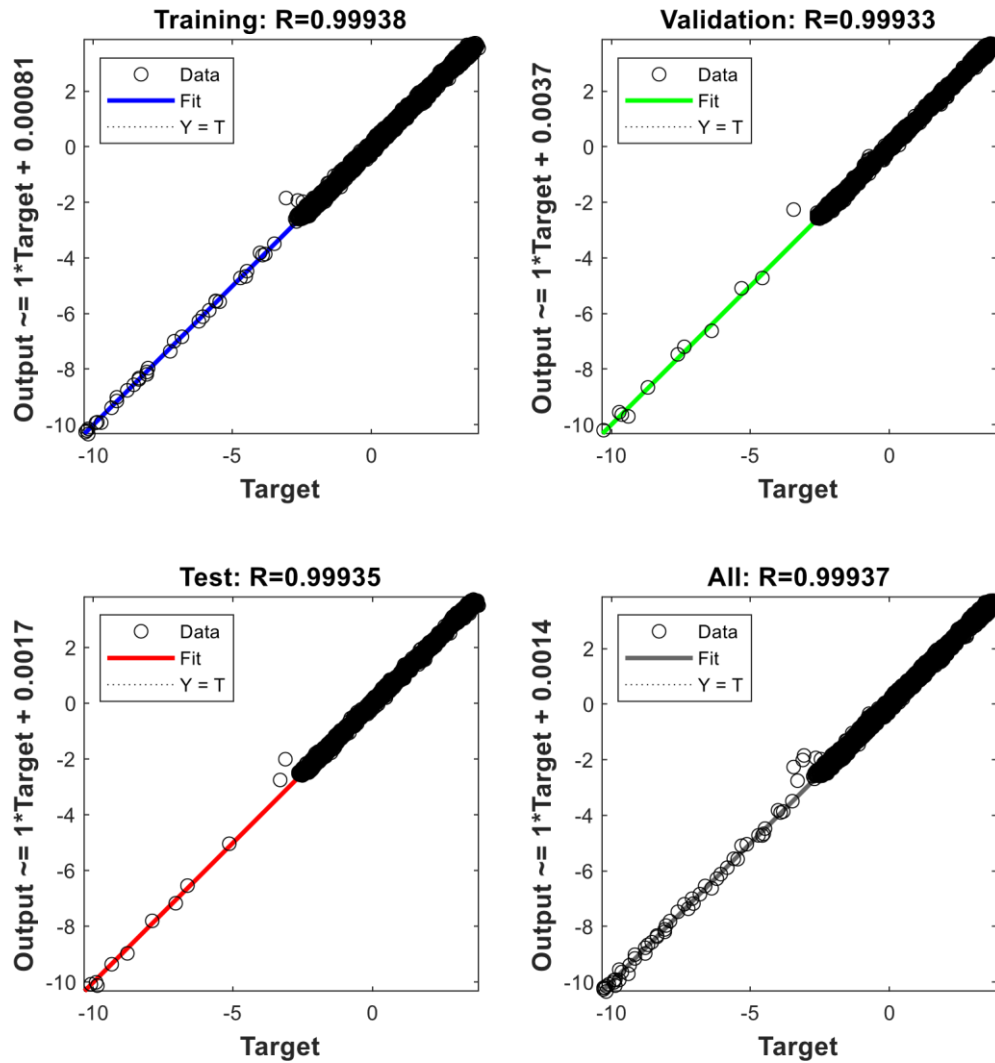


Fig. 40. Regresiones lineales de los conjuntos de datos: a) Regresión de los datos de entrenamiento. b) Regresión de los datos de validación. c) Regresión de los datos de prueba. d) Regresión del total de los datos.

A continuación, se evaluó la respuesta temporal obtenida relacionando gráficamente el resultado de la red NARX contra el objetivo deseado. La Fig. 41 muestra esta comparación, en ella se graficaron los resultados generados por cada uno de los conjuntos de datos y fueron comparados con respecto al objetivo, además, se graficó el error presente en cada uno de los instantes de tiempo en la ejecución del algoritmo.

Entre las características de esta respuesta, se encuentra la diferencia existente entre la señal de corriente en el alimentador de red de suministro en presencia de potencia integrada por el sistema FV y la respuesta obtenida por la red NARX al ingresar en ella una señal de corriente desde el

inversor electrónico al PCC. Por otro lado, en la gráfica correspondiente a los errores, se observa lo comentado en el histograma, donde las diferencias entre los valores objetivos y los resultantes de los tres conjuntos de datos de entrenamiento fueron muy cercanas al valor cero; evidenciando los mayores errores al momento que la señal presentó cambios rápidos y abruptos en su forma de onda.

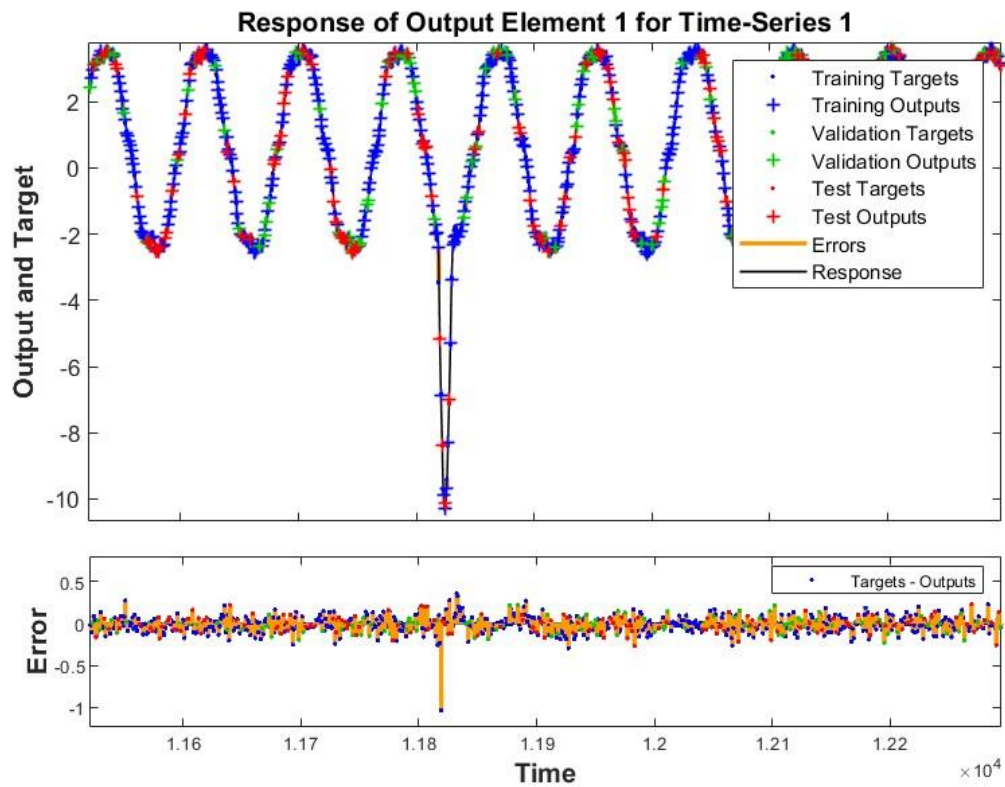


Fig. 41. Respuesta temporal obtenida y error respecto al objetivo.

Por último, se muestran las gráficas de correlación de los errores con respecto del tiempo y las entradas. En la Fig. 42 se grafica la autocorrelación error-tiempo, en ella se puede ver como el entrenamiento fue correcto, debido a que la correlación central (mse) con valor cero, es notoriamente mayor, mientras que parte del resto se encuentran dentro de los límites de confianza. Por otro lado, en la Fig. 43 se muestra la existencia de una gran cantidad de correlaciones entre las entradas y el error, que están dentro de estos límites, mayormente concentrada en el valor cero, por lo que el entrenamiento en este aspecto cuenta con un rendimiento óptimo.

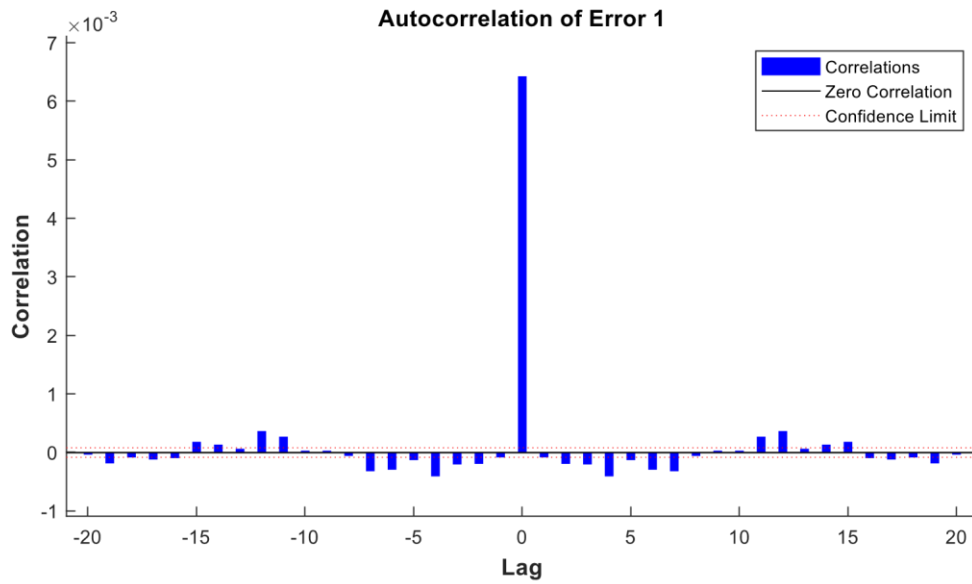


Fig. 42. Autocorrelación error-tiempo.

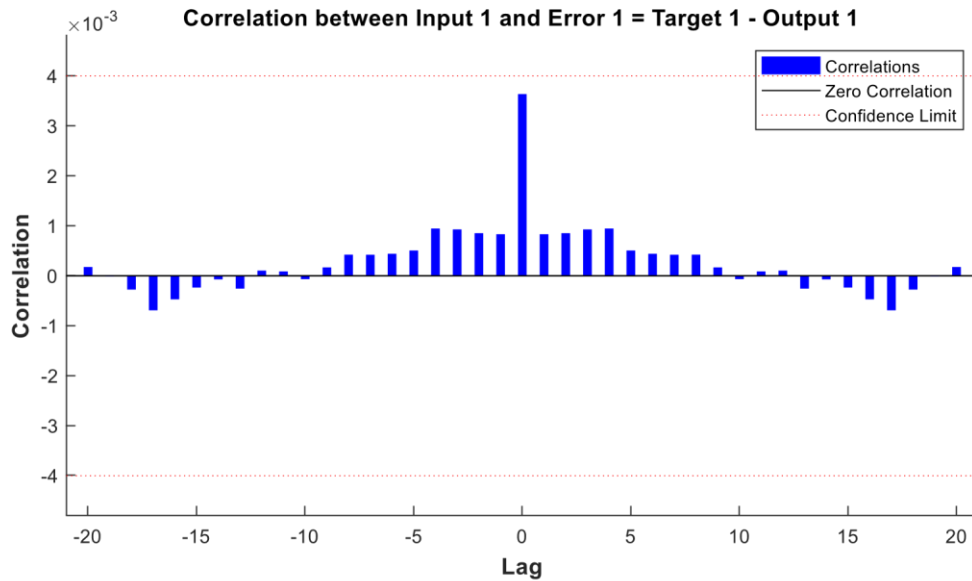


Fig. 43. Correlación error-entrada.

Al cambiar la estructura de la red NARX a lazo cerrado (Fig. 25b), de tal forma que, a partir de las entradas objetivo, la red utilizó sus propias predicciones; se pudo comprobar si el modelo obtenido mediante la red de lazo abierto definía adecuadamente el comportamiento de la señal de corriente en el alimentador de la red de suministro. Con esta arquitectura se produjeron resultados que fueron diferentes a los obtenidos de la respuesta temporal de la Fig. 41, y dependieron de que

tan bueno resultó el entrenamiento. Ahora, los valores objetivo fueron desconocidos y la respuesta temporal obtenida se muestra en la Fig. 44.

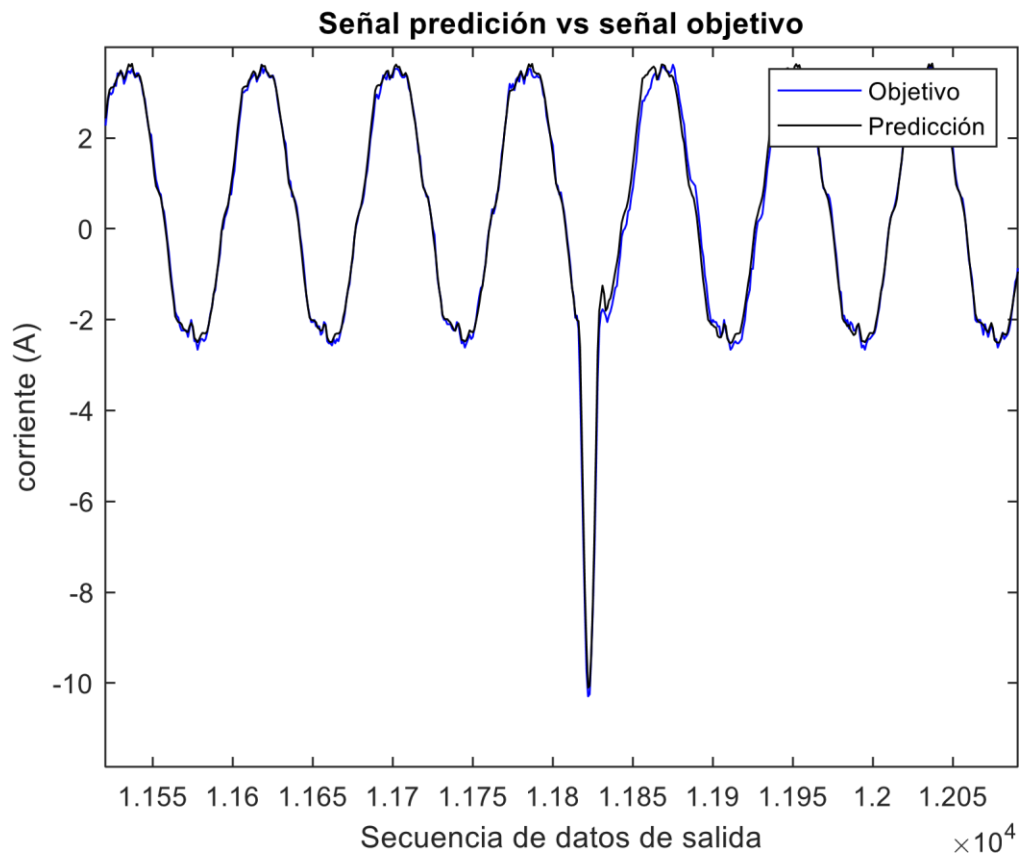


Fig. 44. Comparación de la respuesta temporal de la red de lazo cerrado contra la salida objetivo.

Mientras tanto, en la Fig. 45 se comparó la salida de la red de lazo abierto (modelado), contra la salida objetivo. En ella se puede percibir mucha similitud con la Fig. 44, observándose poca diferencia entre la respuesta temporal de la red de lazo cerrado y la de lazo abierto.

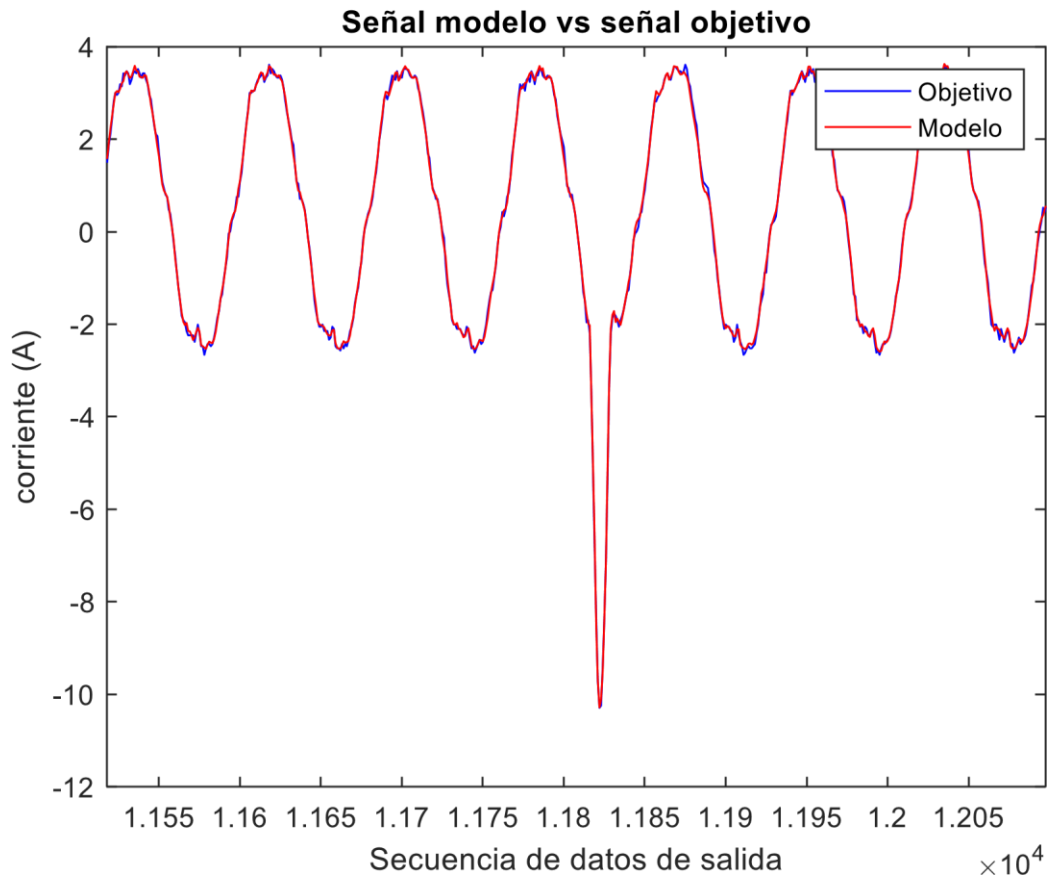


Fig. 45. Comparación de la respuesta temporal de la red de lazo abierto contra la salida objetivo.

Finalmente, el mse para cada uno de los algoritmos es mostrado en la Tabla IX.

Tabla IX. mse en modelado y predicción.

No	Algoritmo	Mse
1	Red NARX de lazo abierto (serie-paralelo)	0.0067
2	Red NARX de lazo cerrado (paralelo)	0.0094

VIII. CONCLUSIONES

El uso creciente de recursos energéticos renovables, así como la integración continua de estos recursos a las redes de suministro eléctrico, requiere una mayor exigencia en el desarrollo del conocimiento sobre la CEE y los mecanismos para mitigar las emisiones armónicas que se generan en dichas redes bajo las condiciones de integración de potencia generada por sistemas FV.

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo principal, caracterizar el comportamiento del contenido armónico de corriente eléctrica en una red de suministro en BT, con integración de la potencia generada por un sistema solar FV mediante inversores de estado sólido (electrónicos), así como el modelado y predicción del comportamiento de dicho contenido armónico de corriente eléctrica en la red anteriormente mencionada, mediante el uso de RNA recurrentes como herramienta de modelación; para lo cual fue necesario evaluar el comportamiento estadístico de la corriente armónica generada por inversores FV, mediante un DDE basado en la comparación de medias y arreglos factoriales completos, esto con el propósito de determinar las tendencias estadísticas del fenómeno armónico en el punto de integración, bajo diferentes condiciones de carga. Este DDE fue aplicado a las diversas configuraciones del banco de pruebas, para determinar cuál de los arreglos presentaba el mayor contenido de THDi, ya que esta configuración sería utilizada en la adquisición de datos, con el fin de llevar a cabo la caracterización y modelado del fenómeno armónico de corriente.

Al término de la aplicación del DDE, se determinó que, en ausencia de inversores, los niveles de THDi en el alimentador red no aumentan cuando se alimentan CR, CL y CC (esto por la naturaleza lineal de las cargas) en PCC, y solo se observó el efecto de resonancia capacitiva, amplificando los armónicos de fondo en el alimentador de red, por efecto de los condensadores.

Por otro lado, se determinó que las corrientes armónicas generadas por los inversores dependen del tipo de inversor y de la impedancia de la red, y se inyectan en el nodo de interconexión, con mayor distorsión armónica a bajo nivel de potencia (se comparó THDi en generación nula, 1 ampere y 4.5 amperes); teniendo el inversor central, un 173% más de distorsión armónica que el arreglo de microinversores, bajo las mismas condiciones de carga resistiva.

La THDi generada por los inversores aparece predominantemente en el alimentador de red, en comparación con los niveles de THDi en el alimentador de carga, siendo hasta un 544% más alto en red que en el lado de carga, cuando el inversor central alimenta carga resistiva con alto nivel de generación (4.5A).

Al analizar los niveles de THDi medidos en el alimentador de red, se encontró que es significativamente menor cuando no hay suministro de corriente del inversor al nodo de interconexión (inversores apagados), en comparación con el valor medido de THDi en los mismos alimentadores con entrada de corriente del inversor (en baja y alta generación), la THDi obtuvo valores hasta un 557% más altos cuando el inversor central, en generación de alto nivel (4.5A) estuvo conectado al nodo, alimentando cargas resistivas. Además, no se encontraron diferencias significativas entre los niveles de THDi medidos en el alimentador de carga cuando no existió contribución de potencia de los inversores al nodo de interconexión (inversores apagados), en comparación con el valor de THDi medido en los mismos alimentadores con el suministro de corriente de los inversores, mostrando solo diferencias significativas por efecto de resonancia capacitiva. Este comportamiento evidenció que el flujo de corrientes armónicas generadas por los inversores se concentra en la red de suministro.

Con lo anteriormente descrito, se determinó que la configuración más adecuada que genera el mayor contenido armónico de corriente en la red de suministro, la conforman el inversor central al alimentar cargas resistivas a su máxima potencia de generación, por lo cual el banco de pruebas se conformó de esa manera para la adquisición de los datos tendientes a la caracterización y modelado, además, se dotó de robustez a la investigación con la implementación y uso de un DDE.

Con los datos adquiridos, se llevó a cabo el estudio de la señal de corriente eléctrica sin aporte de potencia del inversor mediante el uso de herramientas estadísticas y análisis de frecuencia, lo cual permitió establecer el punto de referencia necesario para el estudio de los datos que contienen potencia añadida del sistema de generación FV. Los resultados mostraron claramente un comportamiento estable de los datos, presentando simetría en la distribución de corrientes instantáneas en el histograma y en el gráfico de caja y bigotes. Además, los valores fuera de contexto clasificados como valores atípicos no se manifestaron. La señal estudiada mostró un perfil suave, fácilmente identificable con la forma de una onda sinusoidal y con poca distorsión armónica de fondo.

A partir de lo anterior, se determinó que la distorsión armónica de fondo de la red de suministro analizada, no afecta a la señal de corriente eléctrica, por lo que se pudo considerar como una señal continua, periódica e invariante en el tiempo, además de adecuada en términos de CEE, por lo que sirvió como referencia en el análisis del comportamiento del sistema con integración de potencia FV.

Por el contrario, la contribución de corriente eléctrica del sistema de generación FV introduce hacia la red transitorios de corriente, armónicos pares e impares, así como un offset de CD, todo lo anterior debido al funcionamiento del inversor y la impedancia de la red. El análisis espectral de esta señal muestra una continuidad en los fenómenos descritos, ya que siempre están presentes a lo largo del tiempo de muestreo, así como un aumento notable de la THD con un valor porcentual del 10.01% (con aportaciones armónicas de la tercera, quinta, séptima y décimo primera -frecuencias más representativas-), lo que corresponde a un aumento del 936% con respecto a la señal sin contribución de potencia del inversor (con un THDi del 1.07%).

Se propuso una metodología para modelar y predecir el comportamiento de la corriente eléctrica de la red de suministro eléctrico, con integración de potencia FV. El modelo se realizó utilizando RNA recurrentes, específicamente con una red NARX. Esta red NARX se estructuró utilizando la caja de herramientas de aprendizaje profundo de Matlab.

A partir de los resultados, se determinó claramente que la forma de onda sinusoidal de la corriente eléctrica en la red de suministro se ve afectada cuando las energías del sistema FV se integran en el PCC a través de inversores electrónicos. El modelado del comportamiento dinámico y no lineal de dicha señal mediante las RNA recurrentes utilizadas en esta investigación, muestran el establecimiento de un patrón altamente eficiente en términos de tiempos de ejecución, así como de los recursos computacionales, presentando un mse de 0.0067 con respecto al comportamiento de la señal real; manifestando un alto rendimiento de la red NARX. Por otro lado, la validez del modelo se verificó mediante la predicción de resultados, obteniendo un mse de 0.0094 cuando se utiliza una red NARX de lazo cerrado, valores que se manifiestan en una fuerte correlación entre entradas y valores de error, dentro de límites de confianza.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede afirmar que una red NARX con características adecuadas, puede considerarse capaz de captar la dinámica del tipo de sistema que fue estudiado. El modelo obtenido presenta una gran flexibilidad en cuanto a variedad y cantidad de datos gestionables, permitiendo representar y predecir el comportamiento armónico de la corriente durante largos períodos de tiempo y bajo diversas condiciones de funcionamiento del sistema; esto deja de manifiesto que la hipótesis planteada en esta investigación es verdadera. Además, el algoritmo obtenido se puede transferir a sistemas físicos o virtuales para el control o reducción de fenómenos armónicos que afectan a las redes eléctricas.

Entre las principales ventajas de este modelado con respecto a otras metodologías se encuentran la capacidad y facilidad para representar la dinámica del sistema no lineal, la convergencia con un número reducido de datos y en muy poco tiempo, se puede destacar la idoneidad de representar la dinámica interna, con pocas variables de la red de entrada; robustez para condiciones similares a las del entrenamiento, así como simplicidad en el uso de redes NARX.

IX. REFERENCIAS

- [1] J. Estévez y J. Ortiz, "Identificación de los factores críticos para la implementación de sistemas solares fotovoltaicos en Colombia," *Dinámica Ambiental*, vol. 2, no. 2, pp. 9098, Dic. 2018.
- [2] S. Cortes y A. Arango, "Energías renovables en Colombia: Una aproximación desde la economía," *Revista Ciencias Estratégicas*, vol. 25, no. 38, pp. 375-390. Dic. 2017.
- [3] P. Partha and K. Hosam, "Achieving self-balancing by design in photovoltaic energy storage systems," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 1151-1164, Mar. 2018.
- [4] A. Kumar, V. Pawar, M. Joshi, V. Agarwal, and D. Chandran, "A solar PV retrofit solution for residential battery inverters," in *IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington, DC, USA, 2017, pp. 2986-2990.
- [5] S. Bouchakour, A. Hadj, K. Abdeladim, S. Amrouche, S. Semaoui, B. Taghezouit, S. Boulahchiche, and A. Razagui, "Investigation of the voltage quality at PCC of grid connected PV system," *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 66-70. Dec. 2017.
- [6] K. Mohammad and A. Ibrahim, "Power quality characteristic of residential gridconnected inverter of photovoltaic solar system," in *IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, San Diego, CA, USA, 2017, pp. 1097-1101.
- [7] W. Oliveira, A. Filho, and J. Cormane, "A contribution for the measuring process of harmonics and interharmonics in electrical power systems with photovoltaic sources," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 104, pp. 481-488. 2019.
- [8] S. Oyegoke, Y. Habtay, and S. Skarvelis, "Contribution of inverter based photovoltaic generators to power quality at low voltage," in *50th International Universities Power Engineering Conference*, Stoke on Trent, UK, 2015, pp. 1-6.
- [9] *Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, IEEE Std. 1547, 2003.
- [10] F. Spertino, P. Di Leo, F. Corona, and F. Papandrea, "Inverters for grid-connected of photovoltaic systems and power quality: Case studies," in *3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, Aalborg, Denmark, 2012, pp. 564-529.
- [11] G. Chicco, J. Schlabbach, and F. Spertino, "Experimental assessment of the waveform distortion in grid-connected photovoltaic installations," *Solar Energy*, vol. 83, pp. 1026-1039, Jul. 2009.
- [12] E. A. Mohamed and Z. Zhengming, "Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review," *Renewable Energy and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 112-129, Jan. 2010.
- [13] S. Lee, S. Song, P. Sung-Jun, M. Chae-Joo, and M. Lee, "Grid-connected photovoltaic systems using current-source inverter," *Solar Energy*, vol. 82, pp. 411-419, May 2008.
- [14] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 41, pp. 1292-1306, Oct. 2005.

- [15] H. Haeberlin, "Evolution of Inverters for Grid Connected PV Systems from 1989 to 2000," in *17th European PV Solar Energy Conference*, Munich, Germany, 2001, pp. 426-430.
- [16] *Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks*, CENELEC Std. EN-50160, Jul. 2010.
- [17] *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)*, IEC Std. 61000-3-2, Jul. 2020.
- [18] A. Kotsopoulos, P.J.M. Heskes, and M.J. Jansen, "Zero-crossing distortion in gridconnected PV inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 2, pp. 558-565, Apr. 2005.
- [19] D. Infield, P. Onions, A. Simmons, and G. Smith, "Power quality from multiple gridconnected single phase inverters," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1983-1989, Oct 2004.
- [20] H. Hu, Q. Shi, Z. He, J. He and S. Gao, "Potential Harmonic Resonance Impacts of PV Inverter Filters on Distribution Systems," *IEEE Trans. On Sustainable Energy*, vol. 6, no. 1, Jan 2015.
- [21] D. Srinivasan, W. Ng, and A. Liew, "Neural-Network-Based Signature Recognition for Harmonic Source Identification," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 21, no. 1, Jan. 2006.
- [22] V. Thong and J. Driesen, "Distributed Generation and Power Quality," in *Handbook of Power Quality*, Italy, John Wiley, 2008, pp. 522-526.
- [23] T. Wu, C. Shen, C. Chang, and J. Chiu, "A 1/spl phi/3W grid-connection PV power inverter with partial active power filter," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 635-646, Apr. 2003.
- [24] T. Wu, H. Nien, H. Hsien, and C. Shen, "PV power injection and active power filtering with amplitude-clamping and amplitude-scaling algorithms," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, no. 3, pp. 731-741, Jun. 2007.
- [25] R. Bojoi, L. Limongi, D. Ruiu, and A. Tenconi, "Enhanced power quality control strategy for single-phase inverters in distributed generation systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 798-806, Mar. 2011.
- [26] H. Patel and V. Agarwal, "Investigations into the performance of photovoltaic-based active filter configurations and their control schemes under uniform and non-uniform radiation conditions," *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 1, pp. 12-22, Jan. 2010.
- [27] X. Wang, Z. Fang, L. Jing, W. Lin, and N. Song, "Modeling and control of dual-stage high-power multifunctional PV system in d-q-o coordinate," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1556-1570, Apr. 2013.
- [28] Y. Kuo, T. Liang, and J. Chen, "A high-efficiency single-phase three-wire photovoltaic energy conversion system," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 1, pp. 116-122, Jan. 2003.
- [29] J. Wu, B. Cao, and W. Lin, "Simulation analysis of harmonic characteristics of photovoltaic power generation system based on Matlab," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 412-417, 2019.

- [30] J. Bincy, "Grid integration of PV systems-issues and requirements," in *IEEE International Conference on Circuits and Systems*, Thiruvananthapuram, India, Dec. 2017, pp. 215-219.
- [31] B. Plangklang, N. Thanomsat, and T. Phuksamak, "A verification analysis of power quality and energy yield of a large scale PV rooftop," *Energy Reports*, vol. 2, pp. 1-7. Jan. 2016.
- [32] N. Phannil, C. Jettanasen, and A. Ngaopitakkul, "Power quality analysis of grid connected solar power inverter," in *3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia*, Kaohsiung, Taiwan, Jul. 2017, pp. 1508-1513.
- [33] *Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems*, IEEE Std. 929, Jan. 2000.
- [34] *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (ANSI)*, IEEE Std. 519, March 2014.
- [35] *Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, IEEE Std. 1547, Oct. 2003.
- [36] *Inverters Converters Controllers and Interconnection System Equipment for Use with Distributed Energy Resources*, UL Std. 1741, Jan. 2010.
- [37] *Photovoltaic (PV) Systems — Characteristics of the Utility Interface*, IEC Std. 61727, Jan. 2004.
- [38] Y. Yang, K. Zhou, and F. Blaabjerg, "Current Harmonics from Single-Phase GridConnected Inverters—Examination and Suppression," *Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 221-233, Mar. 2016.
- [39] Y. Aparna and J. Khobragade, "Single Phase Single Stage Grid Connected PV System with Improved Power Quality," in *International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques*, Pune, India, 2016, pp. 253-257.
- [40] D. Balan, "The Impact of Photovoltaic Power Plants Connect into 20 kV Public Grid at Electrical Ruminia-Mures. PV 2.8 MW Case Study," in *7th International Conference on Modern Power System*, Cluj-Napoca, Romania, 2017, pp.1-5.
- [41] F. Pinhabel, A. Dos Santos, A. Matheus, F. Goncalves, D. Iglesias, A. Germano, and 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, pp. 4017-4027, Aug. 2018.
- [42] M. Rodríguez, A. Vázquez, W. Saltos, and R. Josnier, "El Potencial Solar y la Generación Distribuida en la Provincia de Manabí en el Ecuador," *Revista Riemat*, vol. 2, no. 2, pp. 1-5, Dic. 2017.
- [43] N. Phannil, C. Jettanasen, and A. Ngaopitakkul "Power quality analysis of grid connected solar power inverter," in *3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia (IFEEEC 2017 - ECCE Asia)*, Kaohsiung, Taiwan, Jul. 2017, pp. 1-6.
- [44] 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.

- [45] C. Li, "Unstable Operation of Photovoltaic Inverter from Field Experiences," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp. 1013-1015, Jan. 2017.
- [46] 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.
- [47] T. Taylor, O. Gonzalez, and Y. Baghzouz, "Analysis of current distortion in a 12 kW photovoltaic system installation," in *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Belo Horizonte, Brazil, 2016, pp. 243-248.
- [48] 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.
- [49] R. Vieira, M. Izabel, and S. Bandeira, "Analysis of the Power Quality of a GridConnected Photovoltaic System," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 4, pp. 714-721, Apr., 2020.
- [50] A. Mansoor, W. Grady, P. Staats, R. Thallam, M. Doyle, and M. Samotyj, "Predicting the net harmonic currents produced by large numbers of distributed single-phase computer loads," *Inst. Elect. Eng. Trans. Power Dist.*, vol. 10, no. 4, pp. 2001-2006, Oct. 1995.
- [51] E. El-Saadany and M. Salama, "Reduction of the net harmonic current by single-phase nonlinear loads due to attenuation and diversity effects," *Int. J. Elec. Power Energy Syst.*, vol. 20, no. 4, pp. 259-268, May 1998.
- [52] M. Leite, F. Vieira, V. Silva, M. Fortes, and D. Dias, "Harmonic Analysis of a Photovoltaic Systems Connected to Low Voltage Grid," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 1, pp. 112-117, Jan., 2018.
- [53] N. Ahmed, A. Sedky, A. Fatehy, and M. Foda, "Impact of grid-connected photovoltaic system on power-quality indices and its output variations with temperature," *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 710-714, Jun., 2017.
- [54] R. Langella, A. Testa, J. Meyer, F. Möller, R. Stiegler, and S. Djokic, "ExperimentalBased Evaluation of PV Inverter Harmonic and Interharmonic Distortion Due to Different Operating Conditions," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65, no. 10, pp. 2221-2233, May, 2016.
- [55] *Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 4–7: Testing and Measurement Techniques—General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected*, IEC Standard 61000-4-7-2009.
- [56] S. Seme, N. Luka, B. Stumberger, and M. Hadziselimovic, "Power quality experimental analysis of grid-connected photovoltaic systems in urban distribution networks," *Energy*, vol. 139, pp. 1261-1266, Nov. 2017.
- [57] A. Elkholy, "Harmonics assessment and mathematical modeling of power quality parameters for low voltage grid connected photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 183, pp. 315-326, Mar. 2019.

- [58] 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.
- [59] L. Harnefors, X. Wang, A. Yepes, and F. Blaabjerg, "Passivity-based stability assessment of grid-connected VSCs—An overview," *IEEE J. Emerging Sel. Topics Power Electron*, vol. 4, no. 1, pp. 116–125, Mar. 2016.
- [60] T. Messo, J. Jokipii, A. Aapro, and T. Suntio, "Time and frequency-domain evidence on power quality issues caused by grid-connected three-phase photovoltaic inverters," in *Proc. 16th Eur. Conf. Power Electron. Appl.* Lappeenranta, Finland, 2014, pp. 1-9.
- [61] C. Yoon, H. Bai, R. Beres, X. Wang, C. Bak, and F. Blaabjerg, "Harmonic stability assessment for multi-paralleled grid-connected inverters," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1388–1397, Feb. 2016.
- [62] J. He, Y. Li, D. Bosnjak, and B. Harris, "Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based microgrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 1, pp. 234–246, Jan. 2013.
- [63] T. Messo, J. Jokipii, A. Makinen, and T. Suntio, "Modeling the grid synchronization induced negative-resistor-like behavior in the output impedance of a three-phase photovoltaic inverter," in *Proc. 4th IEEE Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst.*, Rogers, AR, USA, 2013, pp. 1-7.
- [64] Wang, F. Blaabjerg, M. Liserre, Z. Chen, J. He, and Y. Li, "An active damper for stabilizing power electronics based AC systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 7, pp. 3318–3329, Jul. 2014.
- [65] B. Wen, D. Boroyevich, P. Mattavelli, Z. Shen, and R. Burgos, "Influence of phaselocked loop on input admittance of three-phase voltage-source converters," in *Proc. 28th IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Long Beach, CA, USA, 2013, pp. 897-904.
- [66] I. Kouveliotis-Lysikatos, P. Kotsampopoulos, and N. Hatziargyriou, "Harmonic Study in LV networks with high penetration of PV systems," in *IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, Netherlands, 2015, pp. 1-6.
- [67] A. Chidurala, T. Kumar, and N. Mithulananthan, "Harmonic impact of high penetration photovoltaic system on unbalanced distribution networks – learning from an urban photovoltaic network," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 4, pp. 485-494, Mar., 2016.
- [68] R. Varma, S. Arifur, T. Vanderheide, and M. Dang, "Harmonic Impact of a 20-MW PV Solar Farm on a Utility Distribution Network," *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 89-98, Apr., 2016.
- [69] R. Anurangi, A. Rodrigo, and U. Jayatunga, "Effects of high levels of harmonic penetration in distribution networks with photovoltaic inverters," In *IEEE International Conference on Industrial and Information Systems*, Peradeniya, Sri Lanka ,2017, pp. 1-6.
- [70] E. Kaufhold, J. Meyer, and P. Schegner, "Modular White-Box Model of single-phase Photovoltaic Systems for Harmonic Studies," in *IEEE Milan PowerTech*, Milan, Italy, 2019, pp. 1-6.

- [71] S. O. Nduka and B. Pal, "Harmonic Domain Modeling of PV System for the Assessment of Grid Integration Impact," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 1154-1165, Oct., 2017.
- [72] Z. Deng, M. Rotaru, and J. Sykulski, "Harmonic Analysis of LV distribution networks with high PV penetration," in *International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, Cluj-Napoca, Romania, 2017, pp. 1-6.
- [73] M. Lu, F. Blaabjerg, and X. Wang, "Interaction Admittance Based Modeling of MultiParalleled Grid-Connected Inverter with LCL- Filter," in *IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, Auckland, New Zealand, pp. 1-7, 2016.
- [74] M. Lu, X. Wang, P. Chiang, and F. Blaabjerg, "Resonance Interaction of Multiparallel Grid-Connected Inverters with LCL Filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 894-899, Jun. 2017.
- [75] C. Yu, X. Zhang, F. Liu, C. Liu, H. Xu, R. Cao, and J. Zhang, "Resonance Characteristics Analysis of Paralleled Inverters Based on Resonance Stability Margin," in *IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, Hefei, China, 2016, pp. 2945-2950.
- [76] C. Yu, X. Zhang, F. Liu, C. Liu, H. Xu, R. Cao, and H. Ni, "Modeling and Resonance Analysis of Multi-Parallel Inverters System Under Asynchronous Carriers Conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 4, pp. 3192-3205, Jun. 2016.
- [77] R. Hartana and G. Richards, "Constrained neural network-based identification of harmonic sources," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 1, pp. 202-208, Feb. 1993.
- [78] J. Wijayakulasooriya, G. Putrus, and P. Minns, "Electric power quality disturbance classification using self-adapting artificial neural networks," *Proc. Inst. Elect. Eng. Gen. Transm. Distrib.*, vol. 149, pp. 98-101, Jan. 2002.
- [79] I. Sudiharto, D. Anggriawan, and A. Tjahjono, "Harmonic Load Identification Based on Fast Fourier Transform and Levenberg Marquardt Backpropagation," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 95, no. 5, pp. 1080, Mar. 2017.
- [80] J. Mazumdar, R. Harley, F. Lambert, and G. Venayagamoorthy, "Neural network based method for predicting nonlinear load harmonics," *IEEE Trans. Power Electr.* Vol. 22, no. 3 pp. 1036–1045, May 2007.
- [81] T. George and D. Bones, "Harmonic power flow determination using the fast Fourier transform," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, no. 2, pp. 530–535, Apr. 1991.
- [82] Li Chun, W. Xu, and T. Tayjasanant, "A critical impedance based method for identifying harmonic sources," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 2, pp. 671–678, Mar. 2004.
- [83] A. Zebardast and H. Mokhtari, "Technique for online tracking of a utility harmonic impedance using by synchronising the measured samples," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 5, pp. 1240–1247, Apr. 2016
- [84] J. Mazumdar, R. Harley, F. Lambert, G. Venayagamoorthy, and M. Page, "Intelligent tool for determining the true harmonic current contribution of a customer in a power distribution network," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 5, pp. 1477–1485, Sep. 2008.

- [85] J. Mazumdar and R. Harley, "Utilization of echo state networks for differentiating source and nonlinear load harmonics in the utility network," *IEEE Trans. Power Electr.*, vol. 23, no. 6, pp. 2738–2745, Nov. 2008.
- [86] W. Xu, X. Liu, and Y. Liu, "An investigation on the validity of power-direction method for harmonic source determination," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, no. 1, pp. 214–219, Jan. 2003.
- [87] J. Plotkin, V. Petrushin, and M. Reichwald, "Harmonic current pollution source determination in a grid connected wind farm," in *Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, Geneva, Switzerland, 2015, pp. 1–5.
- [88] G. Yu and T. Lin, "2m+1 point estimate method for probabilistic harmonic power flow," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, Boston, MA, USA, 2016, pp. 1–5.
- [89] H. Mori and S. Suga, "Power system harmonics prediction with an artificial neural network," in *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Kawasaki, Japan, 1991, pp. 1129–1132.
- [90] M. Rukonuzzaman, A. Zin, H. Shaibon, and K. Lo, "An Application of neural network in power system harmonic detection," in *Proc. IEEE Int. Joint Conf. Neural Networks (IJCNN)*, Anchorage, AK, USA, 1998, pp. 74–78.
- [91] S. Osowski, "Neural network for estimation of harmonic components in a power system," *Proc. Inst. Elect. Eng.* vol.139, no. 2, pp.129–135, Mar. 1992.
- [92] A. Fattah, T. Octavira, I. Sudiharto, E. Wahjono, and D. Anggriawan, "Identification of harmonic loads using fast fourier transform and radial basis Function Neural Network," in *International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IESETA)*, Surabaya, Indonesia, 2017, pp. 198-202.
- [93] M. T. Musavi, W. Ahmed, K. H. Chan, K. B. Faris, and D. M. Hummels, "On the Training of Radial Basis Function Classifiers," *Neural Networks*, vol. 5, no. 4, pp. 595-603, Jul. 1992.
- [94] Y. Hwang and S. Bang, "An Efficient Method to Construct a Radial Basis Function Neural Network Classifier," *Neural Networks*, vol. 10, no. 8, Nov. 1997.
- [95] J. Leonard and M. Kramer, "Radial basis function networks for classifying process faults," *IEEE Control Systems*, vol. 11, no. 3, April. 1991.
- [96] D. Saxena, S. Singh, K. Verma, and S. K. Singh, "HiHT-based classification of composite power quality events," *International Journal of Energy Sector Management*, vol. 8, no. 2, pp. 146–159, May 2014.
- [97] F. Costa, "Boundary wavelet coefficients for real-time detection of transients induced by faults and power-quality disturbances," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 6, pp. 2674–2687, Dec 2014.
- [98] G. Heydt, P. Fjeld, C. Liu, D. Pierce, L. Tu, and G. Hensley, "Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 4, pp. 1411-1416, Oct. 1999.
- [99] A. Mejia, J. Amezcua, A. Dominguez, M. Valtierra, J. Razo, and D. Granados, "A scheme based on PMU data for power quality disturbances monitoring," in *43rd Annual*

- Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Beijing, China, 2017, pp. 3270-3275.
- [100] M. Andrejević, D. Stevanović, and M. Dimitrijević, "Monitoring and classification of nonlinear loads based on artificial neural networks," in *13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, Nis, Serbia, 2017, pp. 443-446.
 - [101] D. Kurnia, M. Ashari, and H. Suryatomo, "Harmonics Reduction for Four-Leg Distribution Network-Connected Single Phase Transformer less PV Inverter System Using Diagonal Recurrent Neural Network," in *International Conference of Artificial Intelligence and Information Technology (ICAIIIT)*, Yogyakarta, Indonesia, 2019, pp. 331335.
 - [102] N. Kumar, B. Singh, and B. Panigrahi, "Framework of Gradient Descent Least Squares Regression-Based NN Structure for Power Quality Improvement in PV-Integrated Low Voltage Weak Grid System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 12, pp. 9724-9733, Jan., 2019.
 - [103] P. Shukl and B. Singh, "Delta-Bar-Delta Neural-Network-Based Control Approach for Power Quality Improvement of Solar-PV-Interfaced Distribution System," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 2, pp. 790-801, Jun., 2020.
 - [104] M. Rodriguez, J. Sotomonte, J. Cifuentes, and M. Bueno, "Classification of Power Quality Disturbances using Hilbert Huang Transform and a Multilayer Perceptron Neural Network Model," in *International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, Porto, Portugal, 2019, pp. 1-6.
 - [105] M. Lopez, L. Ledesma, E. Cabal, C. Rodriguez, H. Miranda, and A. Garcia et al., "EMDbased feature extraction for power quality disturbance classification using moments," *Energies*, vol. 9, no. 7, pp. 565, Jul. 2016.
 - [106] *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Std. 1159-2019.
 - [107] L. Yang, C. Xiong, Y. Teng, Q. Hui, and Y. Zhu, "Study on Harmonic Current Detection in Grid-Connected PV Generation Systems," in *Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA)*, Guiyang, China, 2015, pp. 752-755.
 - [108] A.Y. Hatata and M. Eladawy, "Prediction of the true harmonic current contribution of nonlinear loads using NARX neural network," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 3, pp. 1509-1518, Sep. 2018.
 - [109] M. Hashmi, V. Arora, and J. Priolkar, "Hourly electric load forecasting using nonlinear autoregressive with exogenous (NARX) based neural network for the State of Goa, India," in *International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)*, Pune, India, 2015, pp. 1418-1423.
 - [110] Y. Liu, X. Wang, and Y. Liu, "Asynchronous harmonic analysis based on out-of-sequence measurement for large-scale residential power network," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Pisa, Italy, 2015, pp. 1693-1698.
 - [111] H. Baghaee, M. Mirsalim, G. Gharehpetan, and H. Talebi, "Nonlinear load sharing and voltage compensation of microgrids based on harmonic power-flow calculations using

- radial basis function neural networks,” *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 27492759, Jan. 2017.
- [112] M. Panoiu, C. Panoiu, and L. Ghiormez, “Neuro-fuzzy modeling and prediction of current total harmonic distortion for high power nonlinear loads,” in *Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA)*, Thessaloniki, Greece, 2018, pp. 1-7.
 - [113] M. Panoiu, C. Panoiu, and I. Sora, “Modeling the Electromagnetic Pollution of the Electric Arc Furnaces,” *Revue Roumaine des Sciences Techniques-Serie Electrotechnique Et Energetique*, vol. 54 no. 2, pp. 165-174, Apr. 2009,
 - [114] M. Esfahani and B. Vahidi, “A New Dynamic Intelligent Time Domain Arc Furnace Modeling based on Combination Adaptive Neuro-fuzzy Inference System and Chain Code,” *Electric Power Components and Systems*, vol. 44, no. 11, pp. 1261-1275, May 2016,
 - [115] H. Samet, M. Farhadi, and M. Mofrad “Employing Artificial Neural Networks for prediction of electrical arc furnace reactive power to improve compensator performance,” in *2nd IEEE Energycon Conference & Exhibition*, Florence, Italy, 2012, pp. 249-253.
 - [116] C. Chen and Y. Chen, “A Neural-Network-Based Data Driven Nonlinear Model on Time- and Frequency-Domain Voltage– Current Characterization for Power-Quality Study,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, Jun. 2015
 - [117] M. Panoiu, C. Panoiu, L. Ghiormez, and A. Iordan, “Artificial neural networks in predicting current in electric arc furnaces,” *International Conference On Applied Sciences*, Wuhan, China, 2014, pp. 1-8.
 - [118] C. Sankaran, *Power Quality*, 1st ed. United States of America: CRC Press LLC, 2002.
 - [119] *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: -Characteristics of the Utility Interference Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*, IEC Std. 61000-2-2/4-2014.
 - [120] *IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment*, IEEE Std. 1100-2005.
 - [121] *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*, IEC Std. 61000-4-30-2015.
 - [122] M. Sánchez, *Calidad de la Energía Eléctrica*, 1ra ed. México: ITP, 2009.
 - [123] J. Douglas, "Solving problems of power quality," *EPRI Journal*, vol. 18, no. 8, pp. 6-15, Dec. 1993.
 - [124] R. Dungan, M. McGranaghan, S. Santoso and H. Wayne, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed. United States of America: McGraw-Hill, 2004.
 - [125] E. Harper, *El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica*, 1ra ed. México: Limusa, 2004.
 - [126] S. Barcon, R. Guerrero e I. Mariñez, *Calidad de la Energía-Factor de potencia y filtrado de armónicas*, 1ra ed. México: McGraw-Hill, 2012.
 - [127] F. Dekhandji, “Detection of power quality disturbances using discrete wavelet transform,” in *5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B)*, Boumerdes, Algeria, 2017, pp. 1-5.
 - [128] M. Schae and C. Sourkounis, "Influences of power supply quality on electric equipment in production processes," in *Proc. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Vienna, Austria, 2013, pp. 2081-2086.

- [129] M. Valtierra, R. Romero, A. Garcia, and R. Osornio, "FPGA-based instantaneous estimation of unbalance/symmetrical components through the Hilbert transform," in *Proc. 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Vienna, Austria, 2013, pp. 2279-2284.
- [130] M. Valtierra, R. Romero, R. Osornio, and A. Garcia, "Detection and classification of single and combined power quality disturbances using neural networks," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 5, pp. 2473-2482, May 2014.
- [131] Z. Oubrahim, V. Choqueuse, Y. Amirat, and M. Benbouzid, "Classification of three-phase power disturbances based on model order selection in smart grid applications," in *Proc. 42th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Florence, Italy, 2016, pp. 5143-5148.
- [132] M. Bakar, "Assessments for the impact of harmonic current distortion of nonlinear load in power system harmonics," in *Transmission and Distribution Conf. and Exposition: Latin America IEEE/PES*, Bogota, Colombia, 2008, pp. 1-6.
- [133] P. Axelber, M. Bollen, and I. Yu-Hua, "Trace of Flicker Sources by Using the Quantity of Flicker Power," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 465-471. Jan. 2008.
- [134] J. Royo y E. Aznar, "El origen de los 50-60 Hz en la transmisión de la energía eléctrica," *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, pp. 1-6, Sep. 2001.
- [135] O. Churio, M. Vanegas, y G. Valencia, "Estudio y diagnóstico de la calidad de la energía de un campus universitario en la Costa Norte de Colombia," *Avances: Investigación en ingeniería*, vol. 15, no. 1, pp. 271-285. Dic. 2018.
- [136] K. Cao, W. He, X. Zhao, and J. Cao, "Influence of the interface charges' location on the threshold voltage of pMOSFET," in *12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, Guilin, China, 2014, pp. 1-3.
- [137] A. Arellano, D. Mireles, y R. Samayoa, "Mejora de la confiabilidad en el edificio Valdés Vallejo de la UNAM," tesis de pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2001.
- [138] M. Badoni, B. Singh, and A. Singh, "Implementation of Echo-State Network-Based Control for Power Quality Improvement," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 5576-5584, Jul. 2017
- [139] G. Robledo, "Calidad de la Energía Eléctrica: Camino a la Normalización," en *Simposio de metrología*, Santiago de Querétaro, México, 2008, pp. 1-7.
- [140] A. P. Bísaro, R. Pereira, M. Kezunovic, and J. Mantovani, "Integrated Fault Location and Power-Quality Analysis in Electric Power Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 2, pp. 428-436, Aug. 2015.
- [141] M. Sullivan, B. Noland, T. Vardell, and A. Vojdani, "Interruption costs, customer satisfaction and expectations for service reliability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 989-995, May 1996.
- [142] J. Pulgar, "Costos de la Calidad en las Empresas del Sector Eléctrico," *REDIP. UNEXPO. VRB*, vol. 1, no. 1, pp. 1-13, Feb. 2011.

- [143] D. Lineweber and S. McNulty, "The Cost of Power Disturbances to Industrial & Digital Economy Companies," EPRI, United States of America, Technical Report, no. 1006274, Jun. 2001.
- [144] S. Elphick, P. Ciufu, V. Smith, and S. Perera, "Summary of the economic impacts of power quality on consumers," in *Power Engineering Conference (AUPEC)*, Wollongong, Australia, 2015, pp. 1-6.
- [145] J. Mina, E. Caicedo, y C. Lozano, "Una propuesta de integración de arquitecturas de generación descentralizada en ambientes de micro-redes," *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 11, no. 22, pp. 9-17, Nov. 2018.
- [146] M. Rodríguez, A. Vázquez, W. M. Saltos, y R. Josnier, "El Potencial Solar y la Generación Distribuida en la Provincia de Manabí en el Ecuador," *Revista Riemat*, vol. 2, no. 2, pp. 1-5, Dic. 2017.
- [147] Zhou, Y. Zhang, X. Lin, C. Li, Z. Cai, and P. Yang, "Optimal Sizing of PV and BESS for a Smart Household Considering Different Price Mechanisms," *IEEE Access*, vol. 65, no. 8, pp. 6740-6750, Jan. 2018.
- [148] C. Linares y B. Rolón, "Producción de Películas Delgadas para Producción de Celdas Fotovoltaicas," *Jóvenes en la Ciencia*, vol. 4, no. 1, pp. 2590-2596, 2018.
- [149] J. González, "Nuevas Tecnologías en el Desarrollo de Celdas Solares," *Perfiles de Ingeniería*, vol. 14, no. 14, pp. 49-61, Oct. 2018.
- [150] A. Khandelwal and P. Neema, "State of Art for Power Quality Issues in PV Grid Connected System," in *International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, Navi Mumbai, India, 2019, pp. 1-4.
- [151] J. Yao, "On-Demand Optimal Cloud Service Provisioning Composition across Multicloud," in *International Conference on Computational and Information Sciences*, Shiyang, China, 2013, pp. 1566-1569.
- [152] M. Rashid, *Electrónica de Potencia*, 3ra ed. México, Prentice-Hall, 2004.
- [153] L. Ituarte, "El inversor multinivel en cascada: constitución y rol en las plantas fotovoltaicas de Jujuy," *Revista Difusiones*, vol. 15, pp. 44-50, Dic. 2018.
- [154] D. Chathurangi, U. Jayatunga, M. Rathnayake, A. Wickramasinghe, A. Agalgaonkar, and S. Perera, "Potential power quality impacts on LV distribution networks with high penetration levels of solar PV," in *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Ljubljana, Slovenia, 2018, pp. 1-6.
- [155] C. Hicks, Y. Baghzouz, and S. Haddad, "Power quality of residential PV system under low solar irradiance and off-grid operation," in *18th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Ljubljana, Slovenia, 2018, pp. 1-5.
- [156] S. Patra, N. Kishor, S. Mohanty, and P. Ray, "Power quality assessment in 3- Φ grid connected PV system with single and dual stage circuits," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 75, pp. 275-288, Oct. 2015.
- [157] H. Pereira, G. Mata, L. Xavier, and A. Cupertino, "Flexible harmonic current compensation strategy applied in single and three-phase photovoltaic inverters," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 104, pp. 358-369, Jul. 2018.

- [158] T. Tho, A. Viet, and P. Minh, "Reduction of harmonics in grid-connected inverters using variable switching frequency," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 82, pp. 242-251, Mar. 2016.
- [159] K. Prasanna, R. Vanitha, and S. Sai, "Reduction of harmonic distortion in microgrids and distribution systems with photovoltaic generators," in *International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC)*, Melmaruvathur, India, 2017, pp. 768-772.
- [160] O. Ajeigbe, J. Munda, and Y. Hamam, "Characterization of harmonic distortions produced by small domestic back-up generators," in *IEEE PES/IAS Power Africa Conference*, Cape Town, South Africa, 2018, pp. 432-437.
- [161] R. Sinvula, K. Abo-Al-Ez, and M. Tariq, "Total Harmonics Distortion (THD) with PV System Integration in Smart Grids: Case Study," in *International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)*, Wellington, South Africa, 2019, pp. 102-108.
- [162] P. Ray, A. Mohanty, and T. Panigrahi, "Power quality analysis in solar PV integrated microgrid using independent component analysis and support vector machine," *Optik*, vol. 180, pp. 695-698, Nov. 2019.
- [163] Y. Zhao, E. Liu, J. Zhu, B. Zhang, J. Wang, and H. Tian, "Rub-impact fault diagnosis of rotating machinery based on Hilbert-Huang transform," in *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Beijing, China, 2015, pp. 32-36.
- [164] J. Burriel, R. Puche, J. Martinez, A. Sapena, and M. Pineda, "Short-frequency Fourier transform for fault diagnosis of induction machines working in transient regime transactions on instrumentation and measurement," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 3, pp. 432-440, Jan. 2017.
- [165] M. Garrido, "The feedforward short-time Fourier transform," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 63, no. 9, pp. 868-872, Feb. 2016.
- [166] J. Zhang, L. Zhang, J. Li, and L. Bai, "Comparison of wavelet and Fourier analysis in harmonics in electric propulsive shipping system," *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Beijing, China, 2015, pp. 1573-1577.
- [167] S. Vergura, M. Carpentier, and V. Puliafito, "A Time-frequency analysis of electrical users by means of Fourier and wavelet transforms," in *IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Florence, Italy, 2016, pp. 1-6.
- [168] X. Yuan, G. Peng, F. Zhang, C. Yang, Z. Yin, S. Ren, and J. Li, "Analysis of power grid harmonics with wavelet network," in *29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Chongqing, China, 2017, pp. 6052-6055.
- [169] W. Lu, X. Du, J. Ding, and X. Wang, "Modal Parameter Identification Based on Fast Fourier Transform and Hilbert Huang Transform," in *2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, Yichang, China, 2012, pp. 2703-2706.
- [170] B. Sofiarto, M. Reza, A. Trisetyarso, and B. Saleh, "Feature Extraction Using Hilbert-Huang Transform for Power System Oscillation Measurements," in *4th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, Semarang, Indonesia, 2017, pp. 93-96.

- [171] I. Chen and D. Ware, "A neural network model for forecasting fish stock recruitment," *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 56, no. 12, pp. 2385-2396, 1999.
- [172] F. Tanco, C. Verrastro, D. Grinberg, y J. Roitman, "Implementación de redes neuronales artificiales en hardware para aplicación en detección automática de fulguraciones solares," *Proyecciones*, vol. 2, no. 1, Abr. 2004.
- [173] M. Hudson, M. Hagan, and H. Demuth, 2019. *Neural Network Toolbox User's Guide*, v7.0., Sep. 2010.
- [174] W. Xia, W. Zhu, B. Liao, M. Chen, L. Cai, and L. Huang. "Novel architecture for long short-term memory used in question classification," *Neurocomputing*, 299, pp. 20-31, Jul. 2018.
- [175] L. YiFei and C. Han "Prediction for Tourism Flow based on LSTM Neural Network," *Procedia Computer Science*, vol. 129, pp. 277-283, Apr. 2018.
- [176] B. Cortez, B. Carrera, J. Kim, and J. Jung, "An architecture for emergency event prediction using LSTM recurrent neural networks," *Expert Systems with Applications*, vol. 97, pp. 315-324, May 2018.
- [177] F. Liu, Z. Chen, and J. Wang, "Video image target monitoring based on RNNLSTM," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 78, no. 4, pp. 1-18, Feb. 2019.
- [178] *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, IEEE Std. 1547-2003.
- [179] M. Astorga, B. Flores, M. Gil, J. García, F. González, J. Ibarra, and M. Lam, "Design of Experiments Applied to a Software Engineering Project Based on Knowledge Processes," in *6th International Conference in Software Engineering Research and Innovation (CONISOFT)*, San Luis Potosí, Mexico, 2018, pp. 59-65.
- [180] J. Charles, F. Hannane, H. El-Mossaoui, A. Zegaoui, T. Nguyen, P. Petit, and M. Aillerie, "Faulty PV panel identification using the Design of Experiments (DoE) method," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 57, pp. 31-38. May 2014.
- [181] S. Dahbi, H. El-Moussami, and L. Ezzine, "Multiple Regression Model for Surface Roughness Using Full Factorial Design," in *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, Seville, Spain, 2015, pp. 1-6.
- [182] A. Salami, F. Ghassemi, and M. Hassan, "Criterion to Evaluate Feature Vectors Based on ANOVA Statistical Analysis," in *24th national and 2nd International Iranian Conference on Biomedical Engineering (ICBME)*, Tehran, Iran, 2017, pp. 1-5.
- [183] H. Gutiérrez y R. De la Vara, *Análisis y Diseño de Experimentos*, 2da ed. México, D.F.: Mc Graw Hill, 2008.
- [184] D. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 6th ed. United States of America: John Wiley & Sons. 2005.

X. ANEXOS

a) Paneles solares policristalinos: son la unión de varios cristales de silicio. Las células de silicio policristalino que forman el panel solar policristalino se originan enfriando artificialmente una célula monocristalina. Lo que sucede a continuación es que cuando el silicio se enfría, se fragmenta, y se forman cristales individuales. Todo este proceso se realiza con el silicio en bloque, que luego es cortado en placas.

<https://www.nionindustries.com.au/wp-content/uploads/2012/08/PLM-250P-60.pdf>



b) Paneles solares monocristalinos: se fabrican con bloques de silicio, que son de forma cilíndrica. Para optimizar el rendimiento y reducir los costes de cada celda solar monocristalina, se recortan los cuatro lados de los bloques cilíndricos para hacer láminas de silicio.

<https://www.tiempoaltiempo.com.uy/wp-content/uploads/2020/04/SW250M-Technical-Data-Sheet.pdf>



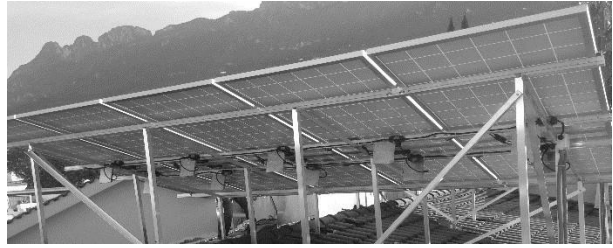
c) Inversores centrales: están diseñados para que se conecten a varias series de paneles solares. Son usados en proyectos grandes como fábricas o granjas solares. Tienen una pantalla para monitorear los datos más relevantes, como la producción de energía o la temperatura del ambiente.

[http://web.absaonline.mx/admin/articulos_doctos/doctos/79817_ABB_PVI3.0_PVI3.8_PVI4.2%20\(1\).pdf](http://web.absaonline.mx/admin/articulos_doctos/doctos/79817_ABB_PVI3.0_PVI3.8_PVI4.2%20(1).pdf)



d) Microinversores: son equipos pequeños y livianos que se conectan entre uno y cuatro paneles, dependiendo el modelo. Tienen una menor potencia, por lo que son usados en negocios pequeños y hogares. Debido a su tamaño, son instalados debajo del módulo fotovoltaico, ya que, entre sus múltiples funciones, provee protección contra elementos como agua y polvo.

https://www.sialsolhome.com/wp-content/uploads/2017/05/MAC250_Datasheet.pdf



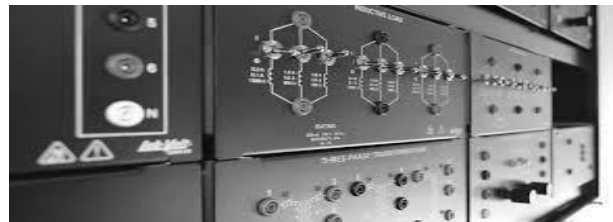
e) **Tableros de distribución:** son gabinetes que contienen los dispositivos de conexión, maniobra, comando, medición, protección, alarma y señalización, que cumplen una función específica dentro de un sistema eléctrico. Su principal función es proteger cada uno de los distintos circuitos en los que se divide la instalación. Deben también soportar los niveles de corrientes de cortocircuito.

https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Specification+guide&p_File_Id=1390770298&p_File_Name=ESPECC_ENTROCARGAQOREV0209.pdf&p_Reference=CENTROS DE CARGA QQ



f) **Módulo de carga resistiva:** alberga nueve resistencias de potencia bobinadas dispuestas en tres bancos. Cada banco consta de tres resistencias conectadas en paralelo que se pueden encender o apagar con palanca conmutadoras para obtener varios valores de resistencia. Esto permite que la resistencia total (equivalente) de cada banco sea aumentada o disminuida por pasos.

https://labvolt.festo.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8311-00_resistive_load



g) **Módulo de carga inductiva:** alberga nueve inductores de potencia con núcleo de hierro dispuestos en tres bancos. Cada banco consta de tres inductores conectados en paralelo que se pueden encender o apagar con palancas conmutadoras para obtener varios valores de inductancia. Esto permite que la inductancia equivalente de cada banco sea aumentada o disminuida por pasos. https://labvolt.festo.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8321-00_inductive_load



h) Módulo de carga capacitiva: aloja nueve capacitores dispuestos en tres bancos idénticos. Cada banco consta de tres condensadores conectados en paralelo que se pueden encender o apagar con interruptores de palanca para obtener varios valores de capacitancia. Esto permite aumentar o disminuir la capacitancia equivalente de cada banco por pasos.

https://labvolt.festo.com/solutions/6_electricity_and_new_energy/50-8331-00_capacitive_load



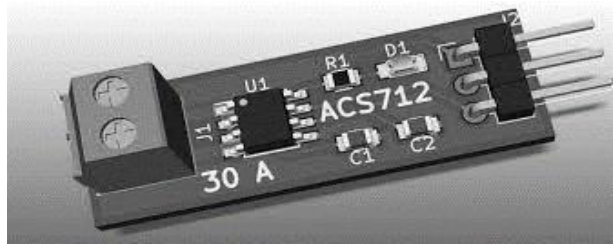
i) Analizadores de redes eléctricas: son instrumentos diseñados para detectar y resolver problemas de caídas de tensión y sobretensiones, armónicos, desequilibrios y otros problemas de calidad eléctrica; capturando los datos necesarios para determinar las directrices necesarias para atacar dichos problemas.

<http://www.finaltest.com.mx/v/vspfiles/assets/datasheet/fluke-435II-434II-437II.pdf>



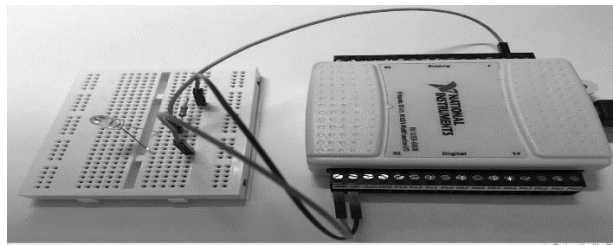
j) Sensor de corriente ACS712: proporciona soluciones precisas y económicas para detección de corriente CA o CC en industrias, sistemas comerciales y de comunicaciones. El dispositivo permite una fácil implementación por parte del usuario. Las aplicaciones típicas incluyen control de motores, detección de carga y gestión, fuentes de alimentación conmutadas y protección contra fallas por sobrecorriente.

<https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>



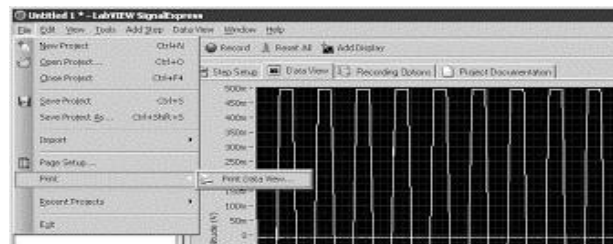
k) Tarjeta USB - 6008: es un dispositivo TAD multifunción de bajo costo. Ofrece E/S analógicas, E/S digitales y un contador de 32 bits. El USB-6008 proporciona una funcionalidad básica para aplicaciones tales como registro de datos simples, mediciones portátiles y experimentos de laboratorio académico. El dispositivo cuenta con una carcasa mecánica liviana y está alimentado por bus para facilitar su transporte.

<https://www.ni.com/pdf/manuals/375295c.pdf>.



l) SignalExpress: es un software interactivo de medición y registro de datos para adquirir, analizar y presentar datos rápidamente de varios instrumentos y dispositivos de adquisición de datos sin programación. Las señales se pueden procesar y analizar, y las señales resultantes se pueden enviar a dispositivos de hardware.

<https://www.tek.com/datasheet/signalexpress/sigexpte>



J) Calibración de equipo de medición: la calibración significa utilizar un estándar de medición, para determinar la relación entre el valor mostrado por el instrumento de medición y el valor verdadero. La confiabilidad de un instrumento de medición se puede garantizar al calibrarlo de acuerdo con un estándar de medición.

https://drive.google.com/drive/folders/1BxCYf10BkF4b1TXehxbRURPzB_pDxnJX?usp=sharing

