

SISTEMA DE MONITOREO DE LA ENERGÍA GENERADA POR FUENTES RENOVABLES Y LA CONSUMIDA POR LAS CARGAS EN UN ENTORNO DE UNA MICRORRED

MONITORING SYSTEM OF ENERGY GENERATED BY RENEWABLE SOURCES AND THE ENERGY CONSUMED BY LOADS IN A MICROGRID ENVIRONMENT

Beatriz Flores García

Instituto Politécnico Nacional, México
bfloresg1302@egresado.ipn.mx

Oscar Carranza Castillo

Instituto Politécnico Nacional, México
ocarranzac@ipn.mx

Rosa de Guadalupe González Huerta

Instituto Politécnico Nacional, México
rgonzalezh@ipn.mx

José Victoriano Chavez Aguilar

Instituto Politécnico Nacional, México
jchaveza@ipn.mx

Recepción: 26/noviembre/2024

Aceptación: 16/abril/2025

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo de un sistema de monitoreo de la energía generada por fuentes renovables y la energía consumida dentro de una microrred. Esto con la finalidad de que el usuario identifique en tiempo real la energía eléctrica consumida por cada una de las cargas conectadas a la microrred; así como, la energía que se genera por las fuentes renovables. El sistema mide el voltaje, la corriente, la frecuencia, la potencia y la distorsión armónica total en diferentes puntos de medición de la microrred, esta información es procesada por el programa desarrollado en LabVIEW. El programa muestra gráficamente al usuario los parámetros eléctricos medidos, como se demuestra en los resultados. Al conocer y medir los parámetros eléctricos, se pueden establecer estrategias para mejorar la eficiencia de los sistemas de energía renovable, así como también, la elección de las cargas eléctricas que se conectarán a la microrred.

Palabras Clave: Cargas eléctricas, Energía eólica, Energía solar, Fuentes renovables, Microrred, Sistema de monitoreo.

Abstract

This paper presents the development of a monitoring system for energy generated by renewable sources and energy consumed within a microgrid. The purpose of this is to allow the user to identify in real time the electrical energy consumed by each of the loads connected to the microgrid; as well as the energy generated by renewable sources. The system measures the voltage, current, frequency, power and total harmonic distortion at different measurement points of the microgrid. This information is processed by the program developed in LabVIEW. The program graphically shows the user the measured electrical parameters, as demonstrated in the results. By knowing and measuring the electrical parameters, strategies can be established to improve the efficiency of renewable energy systems, as well as the choice of electrical loads that will be connected to the microgrid.

Keywords: *Electrical loads, Microgrid, Monitoring system, Renewable sources, Solar energy, Wind energy.*

1. Introducción

En la actualidad, el consumo de energía eléctrica en los hogares ha generado un problema en el incremento del costo por el servicio, mismo que incide en los bolsillos del usuario, debido en gran parte a la dependencia tecnológica que tiene el ser humano a los electrodomésticos, electrónica, cómputo, sistemas inteligentes, entre otros; demandando cada vez más el consumo de energía eléctrica [Lozano, 2013]. El uso de fuentes renovables como suministro de energía eléctrica de consumo confiable y limpio [Montoya, 2011], se propone para disponer de energía eléctrica en una microrred o también en un sistema en modo isla, que son definidos como sistemas pequeños y autónomos que trabajan de manera regulada y controlada, con sistemas de distribución de baja tensión.

En un sistema energético de una microrred, se puede medir y controlar la cantidad de energía que se entrega al sistema eléctrico [Hart, 2021], donde se conectan las

cargas de tipo lineal y no lineal. Las cargas no lineales se caracterizan por ser cargas con impedancias cambiantes, de tal manera que consumen corriente de forma diferente a la forma de onda del voltaje aplicado, además, generan una gran cantidad de armónicos en la red, siendo importante la identificación de la distorsión armónica total (*THD*) que presentan la mayoría de los aparatos conectados al sistema eléctrico; el tener una distorsión armónica alta, se producen pérdidas considerables de energía.

Para este caso se presentan dos casos de estudio, en el primer caso se emula una microrred para evaluar el sistema de monitoreo mediante la medición de las variables que se pueden tener en una microrred; y como segundo se propone probar el sistema de monitoreo en la vivienda sustentable [González, 2024], el cual es un sistema aislado, considerado como una microrred pequeña microrred. La vivienda sustentable se muestra en la Figura 1.



Fuente: elaboración propia

Figura 1 Vivienda sustentable ubicada en ESFM IPN.

2. Métodos

Para el diseño del sistema de monitoreo en la microrred, se toma en cuenta el consumo de energía de las cargas conectadas y el abastecimiento de energía que proporcionan las fuentes renovables, identificando como parámetros principales para su medición al voltaje y corriente [Alexander, 2020], así como también medir la frecuencia y la potencia. Obtenidos los valores antes mencionados, se calcula la energía consumida y la abastecida de toda la microrred.

Otro parámetro que se considera en el monitoreo de la microrred es la distorsión armónica total o también denominado *THD*, la cual es originada cuando ocurren

variaciones en la forma de onda de la señal de corriente o voltaje, originando así señales que contienen componentes armónicos, de los cuales se miden conforme a la normatividad IEEE 519 [IEEE, 2014], que indica sobre la adecuada medición del *TDH* considerando hasta el armónico 25.

Las fuentes de suministro energético que alimentan a la microrred son principalmente consideradas de fuentes renovables, como la energía solar y la energía eólica, que se caracterizan por no consumir recursos contaminantes; porque utilizan recursos naturales con mayor abundancia, además de tener la ventaja de estar en la naturaleza y no se agotan.

Pasando al diseño y análisis de los componentes que permitieron realizar el sensado de los parámetros establecidos, se menciona el uso de la tarjeta de medición monofásica, desarrollada en proyectos anteriores [Romy, 2016], la cual está diseñada por etapas. La primera etapa, sirve para sensar la corriente y voltaje, mediante componentes electrónicos que trabajan bajo el principio del efecto Hall. Este principio es definido como un fenómeno que se produce al aplicar un campo magnético a un material conductor, donde fluye una corriente eléctrica a través de él, generando así una diferencia de potencial en la dirección opuesta al campo magnético y a la corriente eléctrica, denominándose voltaje de Hall [Tipler, 2004], de tal manera que bajo este principio se obtiene el valor de la corriente, conociendo el valor de la intensidad del campo magnético del conductor.

Para medir del voltaje se emplea el transductor LV 25-P, en él debe fluir una corriente proporcional al voltaje medido, siendo adecuado para medir voltajes nominales desde 10 V hasta 500 V, con una corriente de hasta 10 mA_{rms} y para la medición de la corriente, se utilizó el transductor de corriente LTS 15-NP multirango de lazo cerrado que opera a una corriente nominal primaria de 15 A_{rms} .

La segunda etapa corresponde al acondicionamiento de las señales, que permite reducir el ruido de las señales sensadas mediante la amplificación adecuada de las señales. En la Figura 2, se muestra una fotografía de la tarjeta de medición monofásica. La tarjeta de medición monofásica se energiza mediante una fuente de alimentación que suministra voltajes de +15, -15 y +5 V, voltajes que son necesarios para su correcto y adecuado funcionamiento; esta fuente de

alimentación tiene como principales características el uso de un transformador con derivación central de 120 V y salida en el secundario de +15 y -15 V con corriente nominal de 1 A, usando los circuitos integrados L7815CV como regulador de voltaje positivo de +15 V, el integrado L7915ACV como regulador de voltaje negativo de -15 V y el integrado MC7805CT como regulador de voltaje fijo de +5 V.

En la Figura 3, se muestra una fotografía de la fuente de alimentación, mientras que en la Figura 4, se muestra el diagrama a bloques de la conexión de la fuente de alimentación a la tarjeta de medición monofásica.



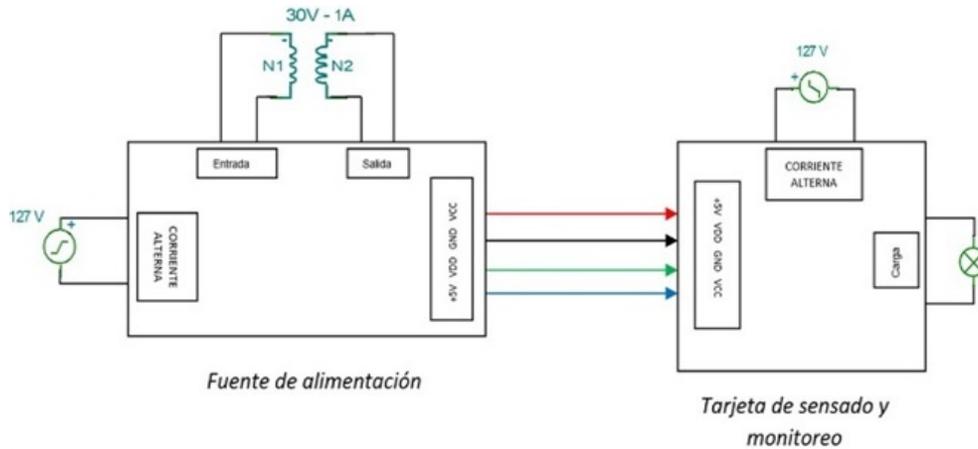
Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Tarjeta de medición monofásica.



Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Fuente de alimentación.



Fuente de alimentación

Tarjeta de sensado y monitoreo

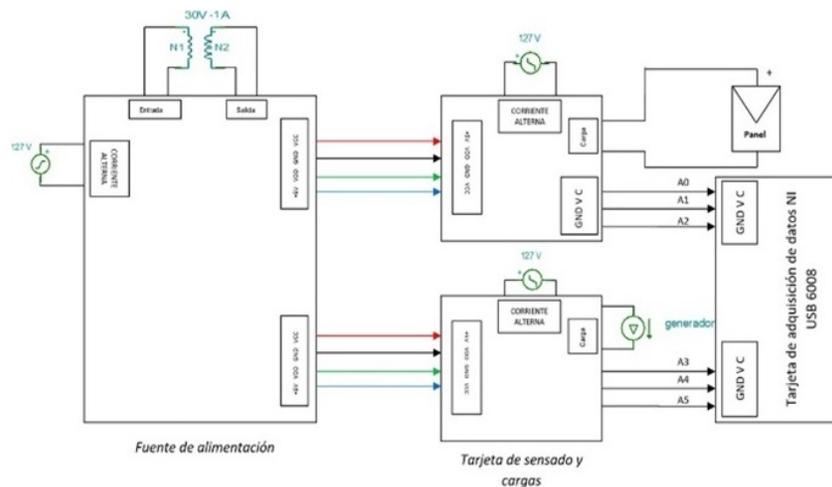
Fuente: elaboración propia

Figura 4 Interconexión de la fuente de alimentación con la tarjeta de medición.

Para el procesamiento de las señales analógicas obtenidas de la tarjeta de medición monofásica, se utiliza una interfaz que se encargará de convertir las señales sensadas analógicas a digitales y enviarlas a la computadora. La computadora por

medio del software LabVIEW, permite mostrar en pantalla los parámetros de medición, así como las ondas de las señales eléctricas de voltaje y corriente. Por lo que, en esta etapa de adquisición de datos, se recopila y procesa la información a través de una tarjeta de adquisición de datos NI USB 6008 y NI USB 6210 de National Instruments.

La tarjeta de adquisición de datos NI USB 6008, se utiliza en el monitoreo de los parámetros eléctricos de las fuentes renovables (eólica y solar), conectándose a la tarjeta de medición monofásica. La tarjeta NI USB 6008, está compuesta de 8 entradas analógicas, con una resolución de 12 bits a una velocidad de muestreo de 10 kHz, utiliza un voltaje máximo de entrada de $\pm 10 V$; la salida analógica es de 12 bits, cuenta con una velocidad de muestreo de 150 Hz; tiene 12 pines digitales de entrada y salida, además de un contador de 32 bits. Las interconexiones se muestran en la Figura 5, con la tarjeta de adquisición de datos NI USB 6008 y con las tarjetas de medición monofásica, además de la fuente de alimentación renovable.



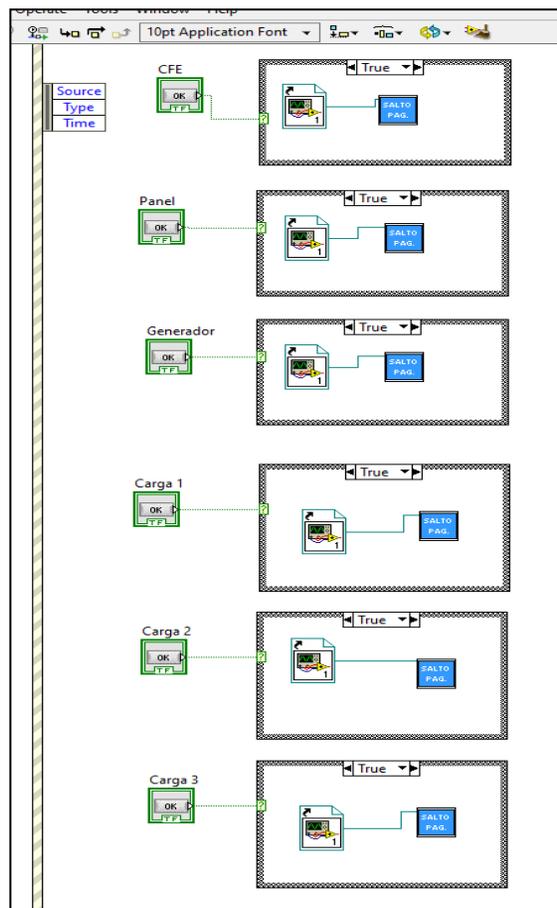
Fuente: elaboración propia

Figura 5 Conexión del sistema de monitoreo de fuentes renovables.

La tarjeta de adquisición de datos NI USB 6210, se utiliza en el monitoreo de los parámetros eléctricos de las cargas conectadas a la microrred, conectándose a la tarjeta de medición monofásica y a la computadora. La tarjeta NI USB 6210, contiene 16 entradas analógicas con resolución de 16 bits a una velocidad de

muestreo de 250 kHz; con un voltaje máximo de entrada de $\pm 10 V$ y una corriente de $\pm 20 mA$; las salidas analógicas son de 16 bits y cuentan con 2 contadores de 32 bits; esta tarjeta facilita el monitoreo de una mayor cantidad de cargas conectadas dentro de la microrred, debido a sus canales analógicos de entrada.

El software LabVIEW, tiene la accesibilidad y compatibilidad con las tarjetas de adquisición de datos NI USB 6008 y NI USB 6210 de National Instruments. La Figura 6, muestra la pantalla de inicio que se realiza basándose en un menú interactivo, mediante la programación de diversos ficheros llamados VI (Virtual Instrument), los cuales permiten la creación de subrutinas que puedan ser llamadas y usadas en el diagrama de bloques de otro programa de LabVIEW [Lajara, 2018], reduciendo considerablemente el código tanto en espacio como en tiempo, además de proyectar un código más limpio y de fácil interpretación.



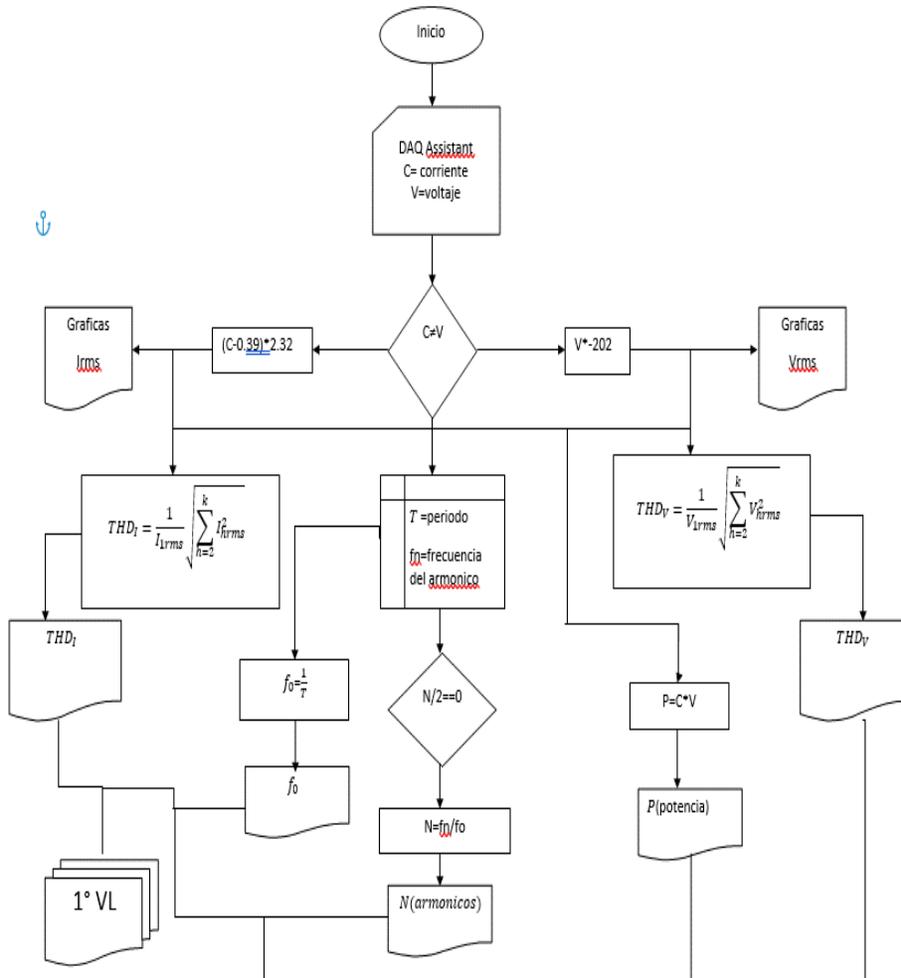
Fuente: elaboración propia

Figura 6 Código del menú en LabVIEW.

El diagrama de flujo mostrado en la Figura 7, determina el proceso para calcular los parámetros eléctricos y en la Figura 8, se muestra el código principal que se establece para programar en LabVIEW.

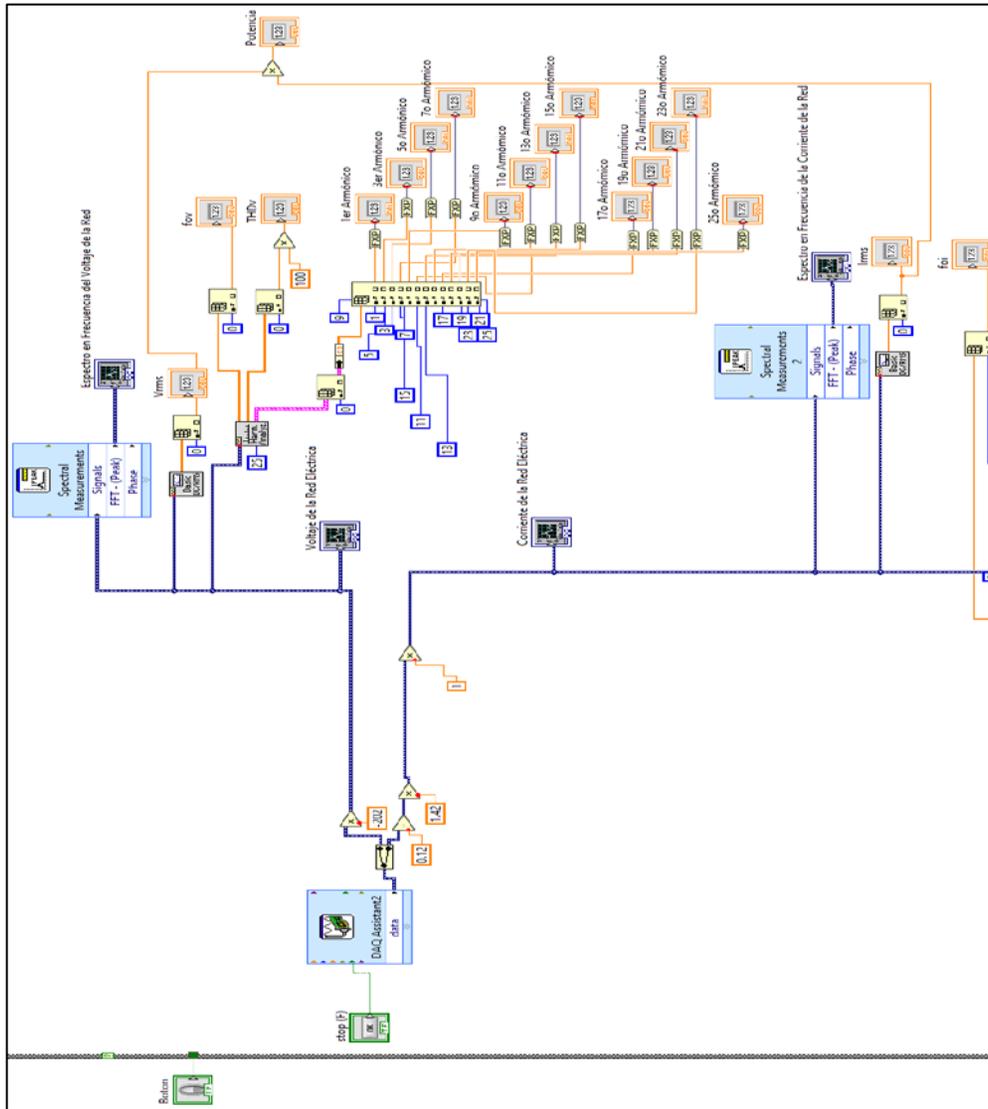
3. Resultados

Con la programación realizada en LabVIEW, se logra visualizar en el menú dinámico el conjunto de señales a monitorear, tanto de la emulación de la microrred de la Figura 9, como el monitoreo de la vivienda sustentable de la Figura 10, además de mostrar los datos y gráficas de los parámetros eléctricos establecidos inicialmente.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Diagrama de flujo del código para el cálculo de parámetros eléctricos.



Fuente: elaboración propia

Figura 8 Código en LabVIEW.



Fuente: elaboración propia

Figura 9 Menú para la emulación del sistema de monitoreo de una microrred.

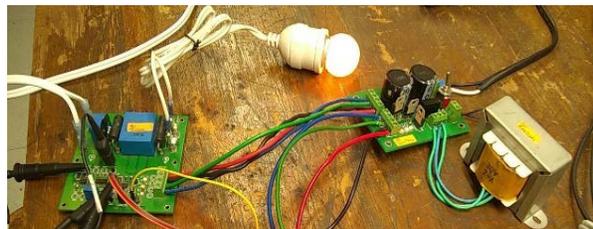


Fuente: elaboración propia

Figura 10 Menú para el monitoreo de la vivienda sustentable.

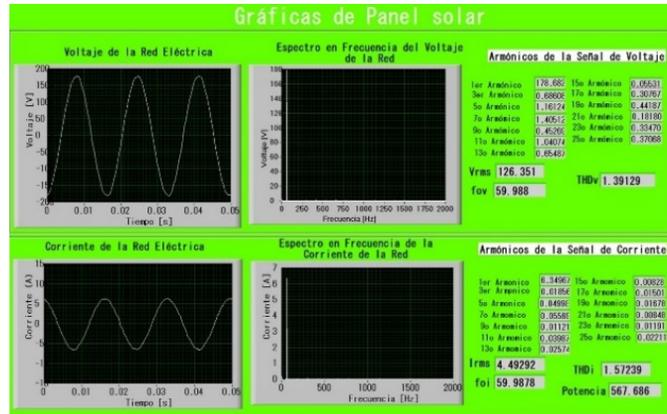
Se realizan las pruebas del sistema de monitoreo de la emulación de la microrred mediante la conexión de cargas lineales y no lineales, y enviando los datos a la interfaz del programa LabVIEW.

Se obtienen los datos de las señales captadas por la tarjeta de medición monofásica, además de que el programa en LabVIEW muestra de manera gráfica y numérica los datos recopilados por la tarjeta de adquisición de datos, presentando las formas de onda de las señales y el espectro de frecuencia tanto de la corriente y del voltaje; además se muestran sus respectivos valores numéricos de los parámetros eléctricos de las señales medidas. Al realizar la primera conexión de sensado en la emulación de los sistemas de generación de energía renovable de la microrred, con una carga de un foco incandescente, Figura 11. La energía consumida por dicha carga (foco incandescente), es la energía suficiente que se suministre a la red eléctrica por la generación de energías renovables. La Figura 12 muestra las gráficas y las mediciones obtenidas de las señales considerando una carga lineal.



Fuente: elaboración propia

Figura 11 Emulación del sistema de generación fotovoltaico con una carga lineal.

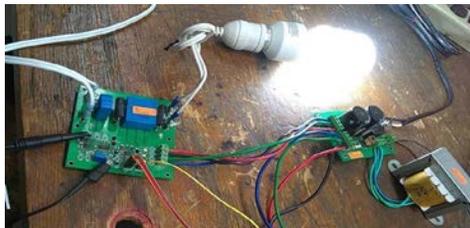


Fuente: elaboración propia

Figura 12 Monitoreo del sistema de generación renovable con una carga lineal.

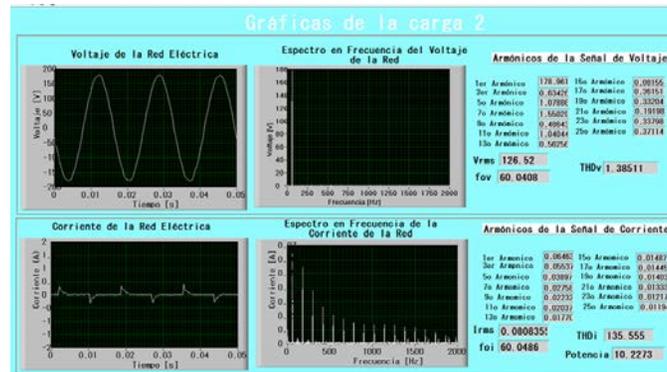
De igual manera, se realizó la segunda prueba, con las respectivas conexiones y monitoreos, en la emulación del sistema de generación de energía renovable, conectando cargas no lineales (puentes rectificadores, lámparas fluorescentes, lámparas LED y monitores de computadoras). En la Figura 13 se muestra la conexión de la carga no lineal con una lámpara LED; y las gráficas de las señales y las mediciones obtenidas empleando una carga no lineal, Figura 14.

Una vez realizada todas las pruebas de monitoreo en la emulación de la microrred, se realiza el monitoreo en una pequeña microrred real, la cual esta implementada en una vivienda sustentable, ubicada en los edificios de la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional [González, 2024]. Esta vivienda sustentable está diseñada de tal manera que su principal fuente de energía está integrada con sistemas de generación fotovoltaica mediante paneles solares, que se encuentran conectados a un regulador, encargado de cargar las baterías de 48 VCD, además de alimentar a un inversor CD-CA, con intervalo del voltaje de salida de 110 – 120 VCA [Cano, 2016].



Fuente: elaboración propia

Figura 13 Emulación del sistema de generación renovable con una carga no lineal.



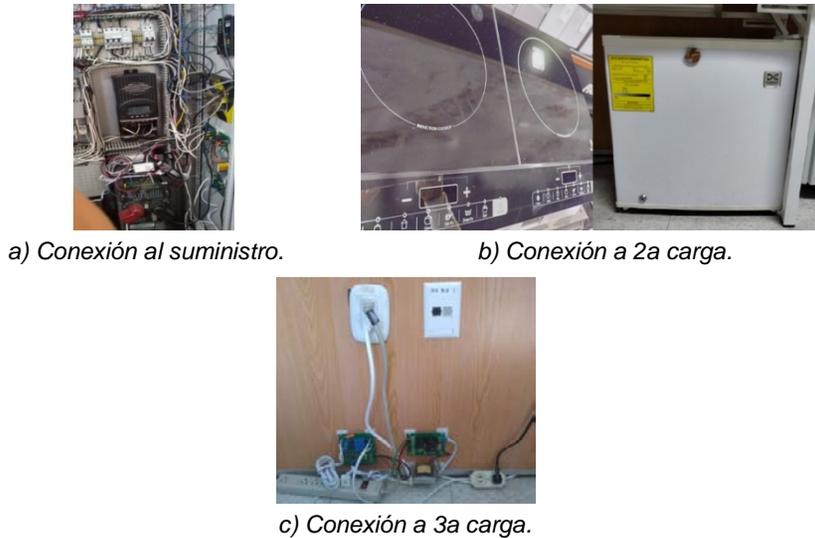
Fuente: elaboración propia

Figura 14 Monitoreo del sistema de generación renovable con una carga no lineal.

Se instalaron dentro de la vivienda sustentable cinco módulos de monitoreo (cada uno compuesto por una tarjeta de medición monofásica y su respectiva fuente de alimentación; el bus de datos, necesario para la comunicación hacia las tarjetas de adquisición de datos NI USB 6008 y NI USB 6210). El primer módulo se encuentra conectado en los interruptores termomagnéticos que se conectan al inversor, como se muestra en la Figura 15 a), de esta manera se podrá monitorear la cantidad de renovable que se está suministrado a la vivienda; el segundo módulo se conecta para monitorear la parrilla de inducción; el tercer modulo se conecta para monitorear el frigobar, debido a que son cargas con las que ya cuenta la vivienda, como se muestra en la Figura 15 b), el cuarto módulo se conecta para monitorear el aire acondicionado; y finalmente, el quinto módulo se conecta para monitorear la pantalla plana de la vivienda, como se muestra en la figura 15 c); de esta forma se distribuyeron los módulos de monitoreo, cuatro para monitorear la energía que consumen las cargas y una para monitorear la energía que proporciona la fuente de energía renovable. Por otro lado, para la instalación de la tarjeta de adquisición de datos, se optó por un área específica para conectar una computadora y la tarjeta de adquisición de datos.

Durante las pruebas realizadas con el sistema de monitoreo dentro de la vivienda sustentable, se llevó a cabo el análisis de afectación al suministro energético, al tener conectado muchas cargas a la vez o en su defecto ninguna carga; ya que la mayoría de los aparatos mostraban una demanda de energía específica, incluso estando únicamente conectados a la red sin estar en funcionamiento. Por ejemplo,

al conectar únicamente la parrilla de inducción, se observa en las gráficas que consume una pequeña cantidad de energía eléctrica, Figura 16.



Fuente: elaboración propia

Figura 15 Conexión de módulos de monitoreo.

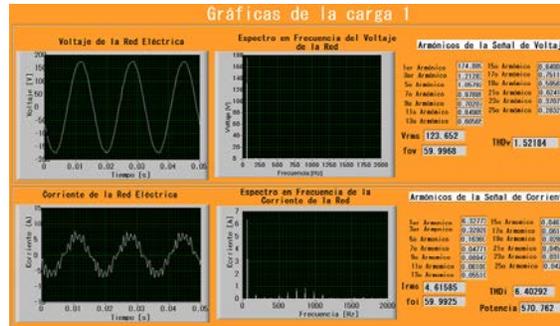


Fuente: elaboración propia

Figura 16 Monitoreo de la parrilla de inducción modo apagado.

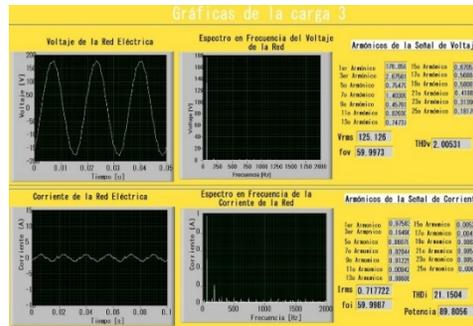
Al poner en funcionamiento la parrilla de inducción, se distinguen las variaciones de los parámetros eléctricos, demandando más corriente al sistema de suministro de energía, como se observa en la Figura 17. Posteriormente se conecta la pantalla plana, las señales de su consumo se muestran en la Figura 18, a pesar de que es un elemento de bajo consumo en comparación con la parrilla de inducción, contienen una mayor cantidad de distorsión armónica que es de 21.52%, en comparación con el THD que tiene la parrilla de inducción que es de 6.4%. De esta manera con el sistema de monitoreo se permite analizar diversos parámetros y

diversas cargas para su adecuado análisis, con respecto al consumo real que tienen y a la distorsión armónica que generan con su funcionamiento.



Fuente: elaboración propia

Figura 17 Monitoreo del sistema de generación renovable con una carga no lineal.



Fuente: elaboración propia

Figura 18 Monitoreo de los parámetros eléctricos de la pantalla plana encendida.

4. Discusión

Este sistema de monitoreo de fuentes renovables y cargas conectadas a una microrred, permite conocer las cantidades de energía suministrada y consumida, llevando a cabo el sensado, registro y visualización de los parámetros que son de utilidad para el análisis. Con el sistema de monitoreo implementado a la vivienda sustentable, se sensa la cantidad de energía suministrada a la red eléctrica y la energía que consumen los electrodomésticos, en donde dichas cargas se consideran elementos principales que debe tener una vivienda.

Los parámetros eléctricos que se monitorean de las cargas conectadas a la vivienda sustentable, proporcionan información detallada de sus requerimientos de energía eléctrica que necesitan para su funcionamiento, e incluso, el desperdicio eléctrico

que realizan al estar solamente conectados a la red eléctrica, además se observa que la mayoría de los aparatos que se monitorearon, contienen una distorsión armónica, que aunque en su defecto parece pequeña, lo ideal sería que no hubiera; al adquirir aparatos eléctricos o electrodomésticos, que son cargas no lineales por su fabricación, el *THD* no se puede eliminar, ocasionando en la red eléctrica una ineficiencia y por consiguiente, origina operaciones deficientes en algunos de los equipos conectados, e incluso hasta fallas severas en todo el sistema de red, esto es debido a que se provoca un incremento considerable en la corriente I_{rms} , generando sobrecargas, calentamientos o descomposturas; además de producir distorsiones y mal funcionamiento en equipos más sensibles; por lo que al implementar este sistema que facilite el conocer estos parámetros eléctricos, ayuda a implementar medidas preventivas que permitan corregir estos problemas.

5. Conclusiones

Este sistema de monitoreo tiene como propósito principal, monitorear el uso de fuentes de energía renovables, que son consideradas como una alternativa más ecológica y limpia para el uso en la vida cotidiana del ser humano, además deseando reducir un alto porcentaje del uso de combustibles fósiles, lo que ayudaría a disminuir la contaminación atmosférica y proveer de energías limpias a las microrredes que cada vez tienen más auge tanto en la investigación, en la industria, comercio y en complejos habitacionales. Al conocer y medir los parámetros de voltaje y corriente, así como la frecuencia y señales de armónicos *THD* que interactúan en una microrred, se pueden establecer medidas para mejorar la eficiencia de los sistemas de energía renovable, así como también, mejorar la elección de cargas (aparatos eléctricos, electrodomésticos, de cómputo, etc.) que se conectarán a la microrred, buscando que tengan un mejor rendimiento energético y ahorro de energía. Además de crear en el consumidor, el hábito de desconectar algunos aparatos de la red eléctrica, puesto que se observó el consumo de energía, aun cuando no está en funcionamiento dicho aparato. Este proyecto tiene más alcances si se mejoran tanto las tarjetas de sensado y las tarjetas de adquisición de datos, con dispositivos electrónicos de bajo costo y con la misma calidad

tecnológica, obteniendo mejoras en el sensado de las señales como en el tratamiento de los datos y lograr mayor confiabilidad en la medición de los parámetros establecidos, como son el voltaje y la corriente. Así como la integración más reducida de los componentes, logrando miniaturizar las tarjetas para que no sean estorbosas y pesadas y permitan su fácil instalación.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Alexander C. K., Sadiku M. N. O. *Fundamentals of Electric Circuits*. McGraw-Hill Companies Inc, Seventh Edition, 2020.
- [2] Cano, I. A. Tesis de implementación de un sistema híbrido solar-hidrógeno para la producción de energía eléctrica aplicada a una vivienda sustentable. México Distrito Federal, 2016.
- [3] González, R. G. Vivienda sustentable. https://www.youtube.com/watch?v=yJn-Y_4zzWQ.
- [4] Hart D.W. *Introduction to Power Electronics*. Prentice Hall, Madrid 2001.
- [5] IEEE-SA Standards Board, IEEE-519-2014 Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. March 27, 2014.
- [6] Lajara J. R., Pelegrí J. *LabVIEW Entorno Gráfico de Programación*. Alfaomega, Tercera Edición, 2018.
- [7] Lozano W. *Energías Renovables*. Unidad de inteligencia de negocios ProMéxico, Ciudad de México, Mayo 2023.
- [8] Montoya F.G., Manzano-Agugliaro F. *Métodos de optimización aplicados a las energías renovables y sostenibles*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Mayo 2011.
- [9] Romay, J. *Implementación de un rectificador controlado PWM aplicado a un sistema de Generación Eólica*. Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias en ingeniería eléctrica, México, 2016.
- [10] Tipler, P. A. *Física 1 Para la ciencia y la tecnología Oscilaciones y Ondas*. Reverté, 2004.