

Medidor bidireccional trifásico interconectado a la red con monitoreo de la generación de energía eléctrica del conjunto panel-microinversor

Three-phase bidirectional meter interconnected to the network with monitoring of the electric power generation of the panel-microinverter set

HERNÁNDEZ-AGUIRRE, Fredy Alberto^{†*}, TÁNORI-RUIZ, Víctor Alfonso, ORRANTE-SAKANASSI, Jorge Alberto y VÁZQUEZ-PALMA, Martín Gustavo

Instituto Tecnológico de Hermosillo, Tecnológico Nacional de México, División de Estudio de Posgrado e Investigación

ID 1^{er} Autor: *Fredy Alberto, Hernández-Aguirre* / ORC ID: 0000-0001-9208-5299, CVU CONACYT ID: 611800

ID 1^{er} Coautor: *Víctor Alfonso, Tánori-Ruíz* / ORC ID: 0000-0002-8727-1430, CVU CONACYT ID: 869159

ID 2^{do} Coautor: *Jorge Alberto, Orrante-Sakanassi* / ORC ID: 0000-0002-3272-8034, CVU CONACYT ID: 209418

ID 3^{er} Coautor: *Martín Gustavo, Vázquez-Palma* / ORC ID: 0000-0001-8982-9883

DOI: 10.35429/JEE.2019.8.3.21.32

Recibido Febrero 20, 2019; Aceptado Marzo 30, 2019

Resumen

El objetivo principal del presente artículo es dar a conocer las actividades realizadas y los resultados obtenidos durante el diseño de un medidor bidireccional trifásico para un sistema fotovoltaico interconectado a la red. Se describen las pruebas para la validación y puesta en marcha del medidor bidireccional utilizado para la medición y monitoreo inalámbrico de los principales parámetros de consumo y generación de energía eléctrica: voltaje, corriente, potencia activa (W), potencia aparente (VA), factor de potencia y consumo energético (kWh). Este medidor bidireccional surge como una propuesta para resolver la problemática relacionada con la medición de la energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, ya que los medidores bidireccionales que actualmente se instalan por la compañía de suministro (CFE, Comisión Federal de Electricidad) presentan el inconveniente que solo pueden ser distribuidos e instalados por la misma compañía. Es un medidor bidireccional de bajo costo y fácil instalación. La principal ventaja de este medidor bidireccional es la facilidad que ofrece al usuario para la lectura e interpretación de las mediciones realizadas, mostradas en la pantalla de una computadora personal o una aplicación móvil. Además, el historial en el consumo energético (kWh) mostrado en la base de datos del medidor, sirve de ayuda al usuario en la toma de decisiones relacionada con la reducción de costos.

Abstract

The main objective of this paper is to present the activities carried out and the results obtained during the design of a three-phase bidirectional meter for a photovoltaic system interconnected to the network. The tests for validation and start up of the bidirectional meter used for wireless measurement and monitoring of the main consumption parameters and electric power generation are described: voltage, current, active power (W), apparent power (VA), power factor and power consumption (kWh). This bidirectional meter was born as a proposal to solve the problem related to the measurement of electric power in photovoltaic systems interconnected to the network, since the bidirectional meters currently installed by the power company (CFE, Comisión Federal de Electricidad) have an inconvenience, they can only be distributed and installed by the same company. It is a low cost and easy installation bidirectional meter. The main advantage of this bidirectional meter is the facility offered to the user to read and understand the readings of the measurements made, displayed on a personal computer screen or a mobile application. Furthermore, the history of the power consumption (kWh) show in the meter database helps the user in making decisions regarding cost reduction.

Medidor Bidireccional, Microinversor, Acondicionamiento, Fotovoltaico

Bidirectional meter, Microinverter, Photovoltaic

Citación: HERNÁNDEZ-AGUIRRE, Fredy Alberto, TÁNORI-RUIZ, Víctor Alfonso, ORRANTE-SAKANASSI, Jorge Alberto y VÁZQUEZ-PALMA, Martín Gustavo. Medidor bidireccional trifásico interconectado a la red con monitoreo de la generación de energía eléctrica del conjunto panel-microinversor. Revista de Ingeniería Eléctrica. 2019. 3-8: 21-32

[†] Investigador contribuyendo como primer Autor.

*Correspondencia al Autor correo electrónico: (faha.singapur@gmail.com)

Introducción

El 6 de junio de 2012 se publicó la Ley General de Cambio Climático en el Diario oficial de la Federación [1], estableciendo entre sus principales propósitos garantizar el derecho a un medio ambiente sano, convocando a los tres niveles de gobierno (municipal, estatal y federal) a unir esfuerzos para la elaboración y aplicación de políticas públicas en dos ejes rectores: la adaptación al cambio climático y la mitigación en las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero.

En cuanto a mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, se establecen instrumentos regulatorios (el Inventario Nacional de Emisiones y el Registro Nacional de Emisiones) y económicos (sistema voluntario de comercio de permisos de emisiones, es decir, mercado de bonos de carbono; así como el Fondo para el Cambio Climático), para el cumplimiento de metas de reducción de emisiones. Así, México se compromete a reducir 30 por ciento sus emisiones hacia 2020; así como 50 por ciento hacia 2050, en relación con las emisiones de 2000. Respecto a las medidas de adaptación, la ley establece instrumentos de diagnóstico, como el Atlas Nacional de Riesgo para 2013, o la creación de instrumentos de planificación urbana y prevención ante desastres naturales.

De acuerdo con la Ley, la electricidad verde debe alcanzar el 35% de la producción total de energía eléctrica en México para el 2024. Por lo que las demandas de dispositivos complementarios para el uso de energía renovable irán en aumento [2]. Según el reporte "Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026" [3], elaborado por la Secretaría de Energía, los costos unitarios de generación de las tecnologías de energías renovables continuarán disminuyendo durante 2012-2035; las principales causas de este decrecimiento serán el aumento en la implantación de las tecnologías, que acelera el progreso tecnológico, y el desarrollo de economías de escala en la fabricación de los equipos asociados. En particular, se espera que los costos de la tecnología solar fotovoltaica en grandes centrales y sistemas integrados en edificios disminuyan considerablemente sus costos. De igual forma pasará con las plantas solares de concentración y los parques eólicos marinos.

De acuerdo con el estudio técnico de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica, realizado por Caicedo Gómez [4], es urgente la necesidad de implementar sistemas para la generación de energía eléctrica por métodos no convencionales como los sistemas fotovoltaicos, esto permitirá la sostenibilidad del medio ambiente para futuras generaciones, reduciendo en gran medida el calentamiento global y los niveles de dióxido de carbono, provocados por los sistemas convencionales utilizados para la generación de energía eléctrica.

De acuerdo con la *Revista UIS Ingenierías*, 18(3), 67-74 [5], Lubo U.D. (2019) propone un mayor incremento en los incentivos económicos para la compra y transferencia de tecnología relacionada con energías renovables, esto permitirá un aumento considerable en el interés por las instalaciones de sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en instalaciones residenciales y comerciales, lo cual repercutirá de manera directa en la mitigación del cambio climático.

Durante la revisión de literatura se encontraron algunos trabajos relacionados con el tema de investigación.

El microinversor propuesto en [6], Estados Unidos Patente US20130242617 A1, 2013, está basado en puentes H para su conexión a la red. Se tiene un Puente H de alta frecuencia basado en MOSFET (*Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor*) y otro de baja frecuencia basado en SCR (*Silicon Controlled Rectifier*); los dos inversores están enlazados a través de un transformador de alta frecuencia con salida rectificadora.

El esquema cuenta con la implementación de cálculos de MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) en una microcomputadora de un solo chip, sistema de sincronía y modulador PWM implementado en un CPLD (*Complex Programmable Logic Device*). El puente H de MOSFET genera señales de alta frecuencia con una modulación sinusoidal PWM, facilitando la operación del puente H de SCR.

El sistema propuesto en [7], Estados Unidos Patente número US 20140084695 A1, 2014, utiliza un conjunto de microinversores conectados en serie, el objetivo es eliminar el uso de transformadores al conectar en serie varios microinversores, que al sumar sus voltajes de salida generan la magnitud requerida en la red.

Una unidad de control se encarga de realizar las funciones de MPPT, coordinar que la fase de los voltajes de salida de los microinversores sea la misma que la del voltaje de red; además, este control realiza tareas de protección y de activación de los interruptores del microinversor. En caso de falla de alguno de los módulos microinversores del arreglo, el controlador activa un dispositivo que elimina su conexión del resto del arreglo, permitiendo la operación continua del sistema. Un módulo de comunicaciones permite enlazarse vía internet hacia una estación remota de monitoreo para realizar control de flujo de potencia.

La alternativa de microinversor presentada en [8], Estados Unidos Patente número US 2014 0112041 A1, 2014, implementa su control en un solo procesador. Este procesador realiza las funciones de monitoreo de las variables eléctricas de entrada y salida, temperatura ambiente cerca del panel, control del microinversor y comunicación vía PLC y/o enlace inalámbrico. Su capacidad de comunicación puede emplearse para un enlace con la red eléctrica y realizar funciones de administración de energía.

El objetivo de este proyecto es diseñar circuitos electrónicos para desarrollar un medidor bidireccional trifásico que pueda ser instalado en un sistema fotovoltaico interconectado a la red, para la medición y monitoreo inalámbrico de los principales parámetros de consumo y generación de energía eléctrica, como son el voltaje efectivo (V_{rms} , *root mean square*), corriente efectiva (A_{rms}), potencia activa (W), potencia aparente (VA), factor de potencia y consumo energético (kWh).

El reto tecnológico consiste en desarrollar un medidor bidireccional de bajo costo y fácil instalación, comparado con los medidores bidireccionales instalados por la compañía de suministro (CFE, Comisión Federal de Electricidad), que muestre los valores medidos en la pantalla de una computadora personal.

En un visualizador de cristal líquido LCD (*Liquid Cristal Display*) o en una aplicación móvil, organizados de forma sencilla para una fácil interpretación del usuario, de manera tal que le permita la toma de decisiones con respecto a la reducción de los costos generados por altos consumos de energía eléctrica (kWh) en las cargas conectadas en la red.

Metodología

Para validar el correcto funcionamiento, de acuerdo a las especificaciones del medidor bidireccional desarrollado, se utilizó la metodología científica basada en el diseño de circuitos electrónicos y pruebas eléctricas.

La arquitectura propuesta para el medidor bidireccional consiste en el diseño de una tarjeta para la adquisición de datos basada en un sensor de corriente de efecto hall y un sensor de voltaje de corriente alterna, así como el código desarrollado en programación Python® para la plataforma Raspberry Pi®. Esta plataforma es utilizada para la adquisición y comunicación de las mediciones realizadas y los cálculos de los parámetros relacionados con la calidad de la energía y el consumo energético (kWh) de las cargas conectadas a la red.

El método científico y experimental utilizado para la validación de la arquitectura del medidor, está fundamentado en el diseño de circuitos electrónicos para el acondicionamiento de las señales de voltaje y corriente alterna, tomado como base la teoría de los amplificadores de instrumentación y las leyes de los circuitos eléctricos. Se realizaron pruebas para caracterizar los sensores de corriente y voltaje, y se conectaron a los circuitos para el procesamiento digital de la información con la plataforma Raspberry Pi 3.

Todos los trabajos realizados relacionados con las pruebas eléctricas, diseño de circuitos electrónicos, diseño y fabricación del circuito impreso, desarrollo del software y la integración del medidor bidireccional en el sistema fotovoltaico interconectado a la red, se llevaron a cabo en el laboratorio de posgrado del Instituto Tecnológico de Hermosillo, en vinculación con personal de la empresa Diseño e Ingeniería sustentable S.A. de C.V.

Las investigaciones realizadas para fundamentar el estado del arte del proyecto, los circuitos electrónicos diseñados, el código desarrollado para la programación del firmware y las pruebas realizadas para la configuración y puesta en marcha del sistema fotovoltaico interconectado a la red, contribuyen de manera satisfactoria en la transferencia de tecnología, formación de recursos humanos, participación en congresos de divulgación científica y generación de patentes por la empresa Diseño e Ingeniería Sustentable S.A de C.V.

Propuesta de solución

El prototipo del medidor bidireccional consiste básicamente en la medición de la corriente alterna suministrada a la carga a través de la acometida de CFE, y de la corriente generada por el sistema fotovoltaico interconectado a la red (panel y microinversor).

La señal analógica obtenida en los circuitos de acondicionamiento de señal se aplica a una etapa de conversión analógica-digital para poder ser procesada en un módulo Raspberry Pi®, a través de los algoritmos desarrollados en programación Python®. Después del procesamiento digital de las señales, los parámetros de interés calculados pueden ser transmitidos a través de comunicación inalámbrica para su visualización y monitoreo en una computadora personal. A continuación, se describen cada una de las etapas desarrolladas para el diseño del medidor bidireccional trifásico.

Características del conjunto panel-microinversor

La solución propuesta para la problemática planteada con respecto a la medición bidireccional de la energía eléctrica total consumida en un sistema trifásico, se muestra en el diagrama a bloques de la figura 1. El suministro de la energía eléctrica es a través de la acometida de Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de un sistema fotovoltaico interconectado a la red. El medidor bidireccional consiste básicamente en las siguientes etapas: sensores de voltaje y de corriente *rms* (*root mean square*), circuitos para el acondicionamiento de señal, convertidores analógico-digital, la unidad central de procesamiento con Raspberry Pi, comunicación inalámbrica y firmware desarrollado en lenguaje Python.

El prototipo propuesto para el medidor bidireccional es una interfaz conectada en el nodo común con la red de suministro de corriente alterna de CFE y la salida del microinversor del sistema fotovoltaico interconectado en la misma red, esto permite al sistema del panel solar operar en paralelo con la red proporcionada por CFE, de modo que la energía puede fluir en ambas direcciones entre la red y el medidor bidireccional. El microinversor tarda de 2 a 5 minutos para sincronizarse (misma fase y misma frecuencia) y empezar a inyectar energía en la red. De este modo, el medidor bidireccional considera ambas cantidades de energía (red de suministro y el sistema fotovoltaico) para calcular el valor neto de energía total en kWh para ser facturado.

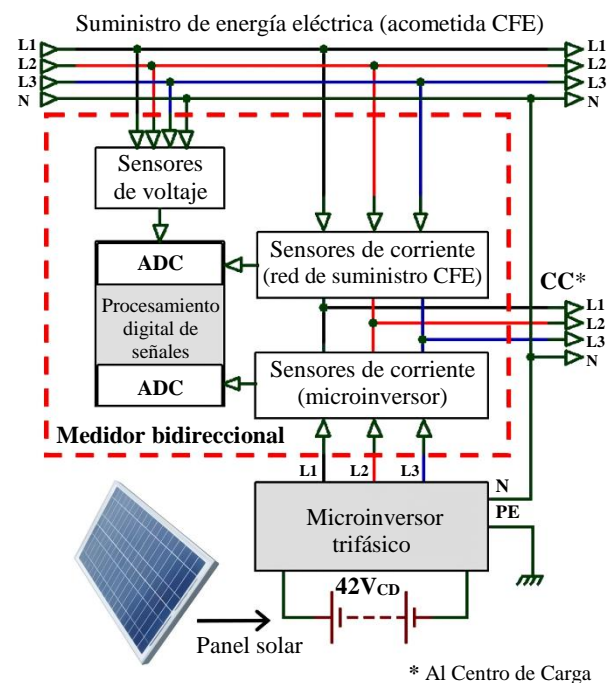


Figura 1 Diagrama a bloques del medidor bidireccional trifásico

Fuente: Elaboración Propia

Generar electricidad con un sistema fotovoltaico interconectado a la red, implica que la carga puede obtener la energía del mismo sistema o de la red de suministro de CFE, es decir, el sistema no es independiente, dejará de producir electricidad cuando no hay energía solar (durante la noche) y entonces toda la energía en la carga será proporcionada por la red de suministro CFE. Durante el día (luz solar), la energía suministrada por el sistema fotovoltaico es utilizada por la carga y de esta manera se reduce el consumo de la red de suministro, impactando en forma directamente proporcional en la reducción de la factura correspondiente [9].

Caracterización y acondicionamiento de la señal

Para las mediciones del voltaje y la intensidad de corriente suministradas por la red de CFE y generadas por el conjunto panel-microinversor interconectado a la red y la carga, se utilizan circuitos de acondicionamiento de señal. En la figura 2 se muestra la arquitectura general para el acondicionamiento de señal para la medición de voltaje y corriente alterna (*rms*: *root mean square*). Las características, configuración y funcionalidad de cada una de las etapas se describen a continuación.

Sensor de voltaje *rms* (*root mean square*). El sensor utilizado para la medición de voltaje es un transformador de corriente alterna, 115:6.3 V y 90 mA, con un divisor de voltaje conectado en el secundario para acondicionar la señal.

El diagrama esquemático correspondiente al circuito de acondicionamiento de señal para la medición de voltaje se muestra en la figura 3. La señal sinusoidal, acondicionada por el divisor de voltaje conectado en el secundario del transformador, se aplica a la etapa de conversión analógica-digital. Se utiliza el amplificador de instrumentación AD623 para mover el voltaje promedio (voltaje de *offset*) de la señal, de este modo la señal aplicada en la etapa del convertidor analógico-digital es una señal sinusoidal positiva en ambos semiciclos. En la figura 4 se muestra la configuración del amplificador AD623 [10].

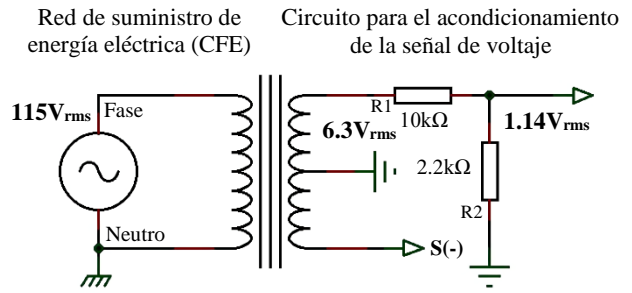
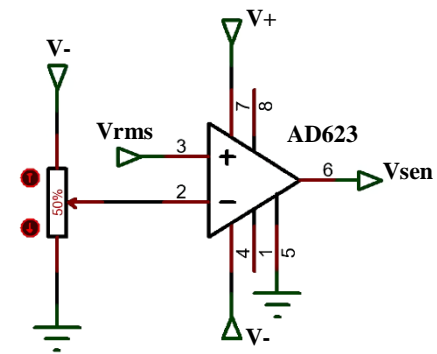


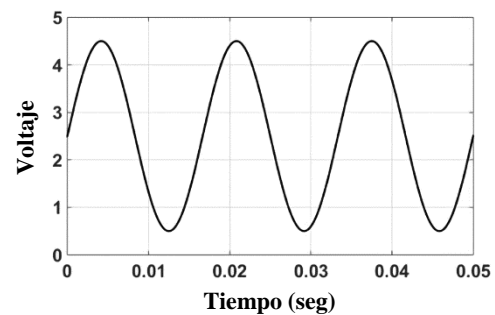
Figura 3 Acondicionamiento de la señal para la medición de voltaje *rms* (*root mean square*)
Fuente: Elaboración Propia

Sensor de corriente *rms* (*root mean square*)

El sensor utilizado para la medición de corriente alterna en la carga es el sensor de efecto Hall bidireccional ACS770LCB-050B, mostrado en la figura 5, con voltaje de alimentación de 5V_{CD}. Sus principales características: voltaje de salida directamente proporcional a la corriente en la carga, sensibilidad de 40mV/A, capacidad máxima de medición de 50Arms, voltaje de salida para corriente nula de 2.5V_{CD} (*offset*) y temperatura de operación de -50°C a 150°C [11].



(a) Amplificador de instrumentación (restador).



(b) Señal sinusoidal positiva.

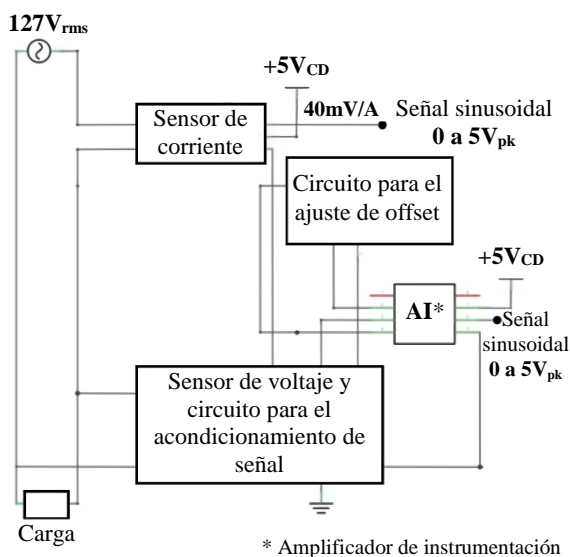


Figura 2 Arquitectura general para el acondicionamiento de señal para la medición de voltaje y corriente alterna.
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4 Circuito para ajustar el voltaje promedio (*offset*) para la señal sinusoidal
Fuente: Elaboración Propia

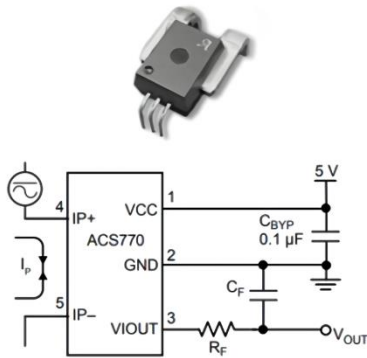
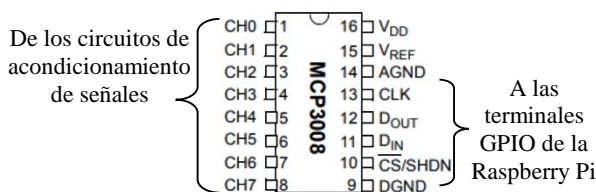


Figura 5 Sensor de efecto Hall utilizado para la medición de corriente rms (root mean square) [11].

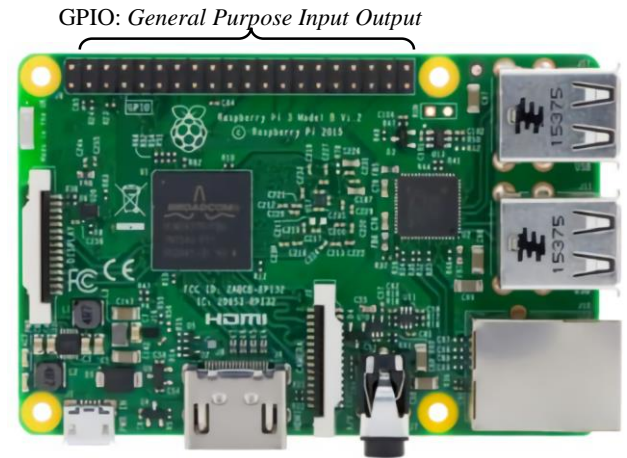
Adquisición y procesamiento digital de las mediciones realizadas

Para la adquisición de datos se utiliza el convertidor analógico-digital MCP3008, configurado y controlado con el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface), programado en la plataforma de procesamiento central Raspberry Pi 3. En la figura 6 se muestra la interconexión de las señales SPI del circuito convertidor AD con las terminales GPIO (General Purpose Input/Output) de la Raspberry.

El circuito MCP3008 es un convertidor ADC del tipo aproximaciones sucesivas, con una resolución de 10 bits, tecnología CMOS, cuenta con ocho canales para entradas analógicas referenciadas a tierra (o cuatro entradas en modo diferencial), voltaje de alimentación de 5V_{CD}, frecuencia de muestreo de 200 ksp/s y temperatura de operación de -40°C a 85°C [12]. El módulo utilizado como unidad central de procesamiento es la Raspberry Pi 3 (8.5cm x 5.3cm), con procesador de 1.2GHz de 64 bits con núcleo ARM, incluye protocolo de comunicación inalámbrica 802.11n, Bluetooth 4.1, RAM de 1 GB, GPIO de 40 pines, puerto micro SD para cargar el sistema operativo y datos, micro USB para alimentación de 5V a 2.5A [13].



(a) Circuito ADC [12].



(b) Módulo Raspberry Pi [13].

Figura 6 Circuito para la interconexión del convertidor ADC MCP3008 y los GPIO de la Raspberry Pi

Arquitectura propuesta para el medidor trifásico bidireccional

En la figura 7 se muestra el diagrama esquemático de las conexiones para el circuito de potencia del conjunto panel-microinversor trifásico conectado a la red de suministro de CFE (Comisión Federal de Electricidad). La señal de salida de cada sensor de corriente (4mV/A) se conecta en un canal del circuito MCP3008 para la conversión analógica-digital a través del protocolo SPI (Serial Peripheral Interface) en la Raspberry Pi. En la figura 8 se pueden apreciar las conexiones de la señal de salida de los sensores de corriente en los canales correspondientes del circuito MCP3008.

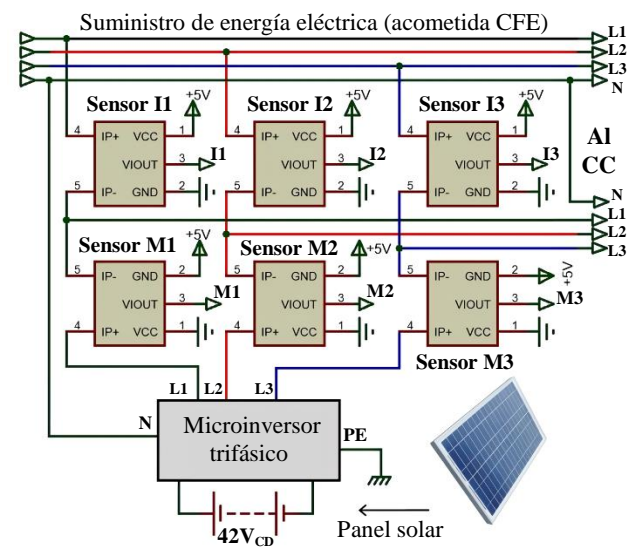


Figura 7 Conexión del suministro de energía eléctrica, microinversor trifásico y los sensores de corriente Fuente: Elaboración Propia

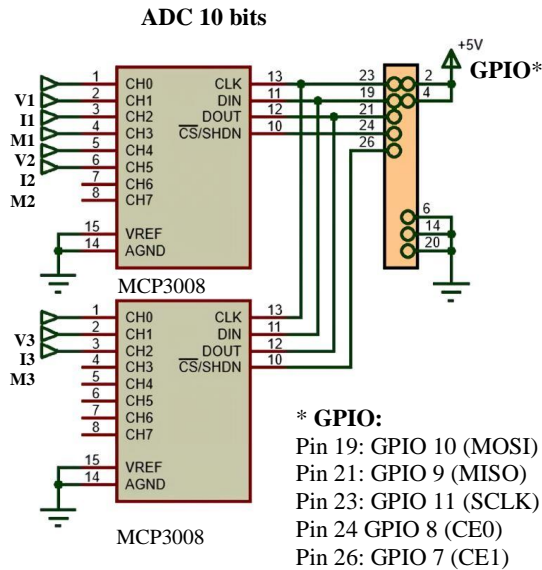


Figura 8 Conexión del circuito ADC MCP3008
Fuente: *Elaboración Propia*

Algoritmos para el cálculo de los parámetros eléctricos

A continuación, se describen los algoritmos desarrollados en el lenguaje de programación Python, para el cálculo de los parámetros relacionados con la generación y consumo energético.

Algoritmo para la adquisición de datos

El algoritmo utilizado para la adquisición de datos está desarrollado en lenguaje de programación Python, y se puede presentar de manera resumida en los siguientes pasos:

1. Importar las librerías para configurar y comunicar el circuito convertidor analógico-digital MCP3008 con la Raspberry a través de los pines GPIO: Adafruit_GPIO, Adafruit_MCP3008 y wringpi.
2. Crear el objeto mcp (MCP3008 virtual) y la función data, para la lectura de los datos SPI.
3. Utilizar la función read_adc() del objeto mcp, para leer los valores de los sensores de voltaje y corriente.
4. Calcular el tiempo que tarda en ejecutarse la función data, para obtener la frecuencia de muestreo f_s .
5. Crear la función data, para generar una tabla con los datos obtenidos a partir de las mediciones realizadas.

En la figura 9 se muestra el diagrama que representa la definición de la función data, para la generación de una tabla con los datos medidos.



Def data (voltageChannel, currentChannel, samples):

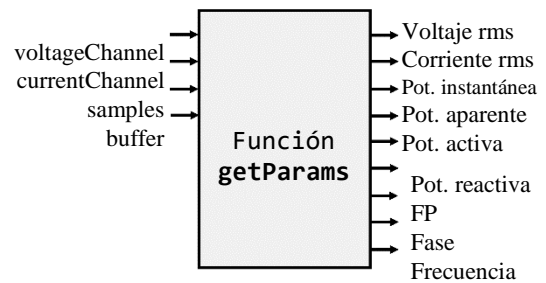
Samples	voltageWindow	currentWindow
1	1.34V	1.11A
2	2.45V	0.34A
3	1.50V	1.00A
...
...

Figura 9 Función generada en Python para la adquisición de los datos medidos

Fuente: *Elaboración Propia*

Algoritmo para el cálculo de los parámetros

Una vez que se han capturado los valores medidos, se desarrolla el algoritmo para el cálculo de los parámetros que se quieren mostrar en pantalla. Para esto, es necesario crear la función getParams, mostrado en la figura 10.



Def getParams(voltageChannel, currentChannel, samples, buffer):

Figura 10 Función generada en Python para el cálculo de los parámetros en el medidor bidireccional.

Fuente: *Elaboración Propia*

Antes de realizar los cálculos de cada uno de los parámetros para mostrar en el medidor bidireccional, es necesario filtrar las señales y modificar el nivel de offset generado por el circuito de acondicionamiento de señal. Para el filtrado de las señales se genera la función mfilter, para la corrección del offset la función correction, representados en la figura 11.

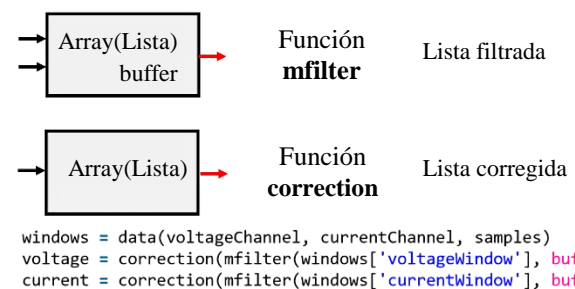


Figura 11 Función generada en Python para el filtro de las señales capturadas y la corrección del offset.

Fuente: *Elaboración Propia*

El resultado de la lista de los valores filtrados y corregidos representan el voltaje y la corriente instantánea, de acuerdo con las ecuaciones:

$$v(t) = V_p \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

$$i(t) = I_p \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

Funciones desarrolladas en Python para el cálculo de los parámetros eléctricos

Potencia instantánea:

```
power = multiply(voltage, current)
```

Se multiplica elemento por elemento para generar la lista $p(t)$.

Valores efectivos de voltaje y corriente:

```
vrms = rms(voltage)
```

```
irms = rms(current)
```

Para una mejor precisión en los cálculos de los valores efectivos, la función utiliza la ecuación definida por:

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i^2(t) dt} \quad (3)$$

Potencia aparente:

```
apparentPower = vrms * irms
```

Potencia promedio (real o activa):

```
realPower = mean(power)
```

Para una mejor precisión en los cálculos de la potencia real en la carga, la función utiliza la ecuación:

$$P_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \sum_{i=0}^T v(t) i(t) \quad (4)$$

Factor de potencia:

```
powerFactor = realPower/apparentPower
```

Ángulo de fase:

```
angleRad = math.acos(powerFactor)
```

```
angleDeg = angleRad*180/math.pi
```

Potencia reactiva:

```
reactivePower = apparentPower * math.sin(angleRad)
```

Frecuencia y THD (Total Harmonic Distortion)

Para calcular la **frecuencia** y la distorsión armónica total **THD**, se utiliza la función `powerQuality(voltage, fs)`. Las entradas a la función son la lista de voltaje y la frecuencia de muestreo, y entrega los valores de la frecuencia y el valor de THD:

```
powerQuality(voltage,fs)
analysis = powerQuality(voltage, windows['fs'])
...
frequency = analysis['frequency']
thd = analysis['thd']
```

Se utiliza la librería `numpy(np)` para:

- Calcular la transformada rápida de Fourier (FFT: *Fast Fourier Transform*) de la lista de voltaje, la componente de mayor magnitud es la que determina la frecuencia fundamental:


```
x = np.array(voltage)
y = np.fft.fft(x)
```
- Para calcular la distorsión armónica total:


```
thd = 100 * math.sqrt(components) /yscaled[np.argmax(yscaled)]
```

Energía neta (kwh):

```
energy = 0
```

```
delta = 0
```

```
energy = realPower * delta / 3600000.0 + energy
```

Resultados

En la figura 12 se muestra la mesa de trabajo utilizada para las pruebas realizadas al medidor bidireccional.

La conexión de los componentes para el sistema fotovoltaico interconectado a la red se puede apreciar la figura 13. El panel solar utilizado es de 300W, 36V_{CD} a 8.17A, conectado a un microinversor trifásico, con una potencia máxima de salida de 900W, voltaje nominal de 120V/208V y corriente nominal de 2.5A por fase.

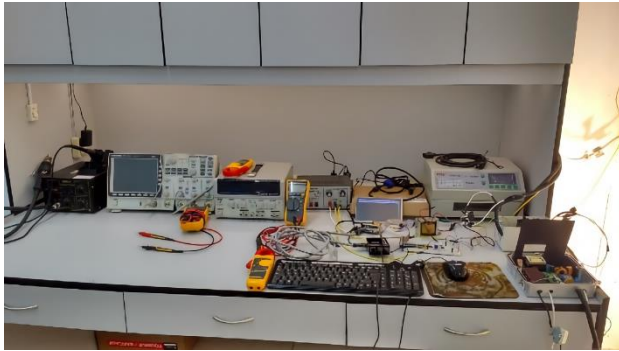


Figura 12 Mesa de trabajo para las pruebas con el prototipo del medidor bidireccional
Fuente: *Elaboración Propia*

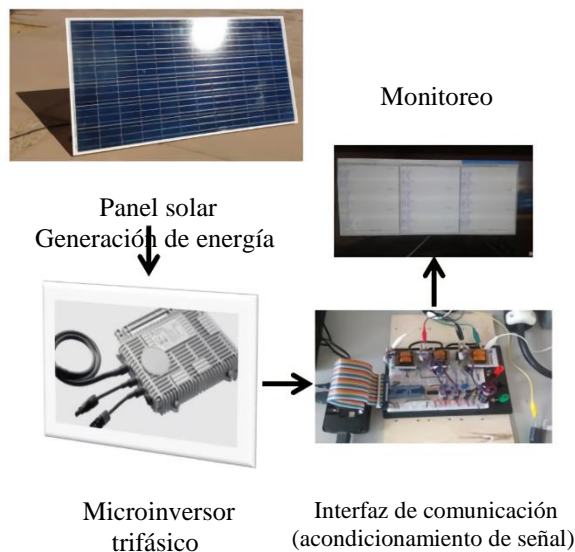


Figura 13 Interconexión de los componentes del sistema fotovoltaico y medidor bidireccional.
Fuente: *Elaboración Propia*

En la figura 14 se muestra la interconexión de la red de suministro a la tarjeta de adquisición de datos. Ambos circuitos, sistema fotovoltaico y red de suministro, se interconectan al circuito de acondicionamiento de señal para realizar las pruebas y ajustes de acuerdo con los valores esperados.

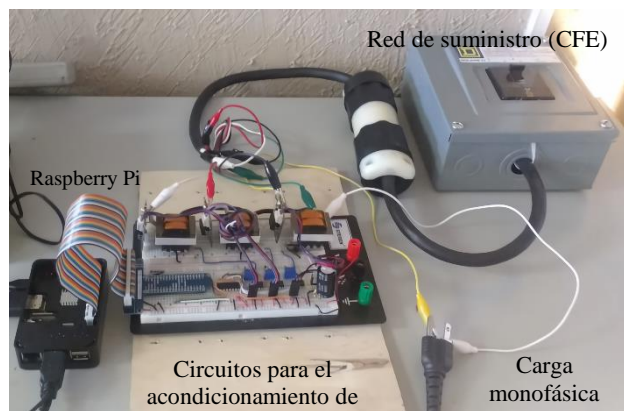


Figura 14 Circuito para el acondicionamiento de señal del medidor bidireccional
Fuente: *Elaboración Propia*

En la figura 15 se puede observar el diseño del circuito impreso para la tarjeta de adquisición de datos, después de haber validado su fabricación de acuerdo con las pruebas realizadas. En la figura 16 se muestra la conexión de tres lámparas, una por línea, y en la figura 17 se pueden ver las lecturas de un medidor comercial de voltaje, corriente, potencia y factor de potencia, utilizado para comparar los parámetros obtenidos con el medidor bidireccional trifásico.

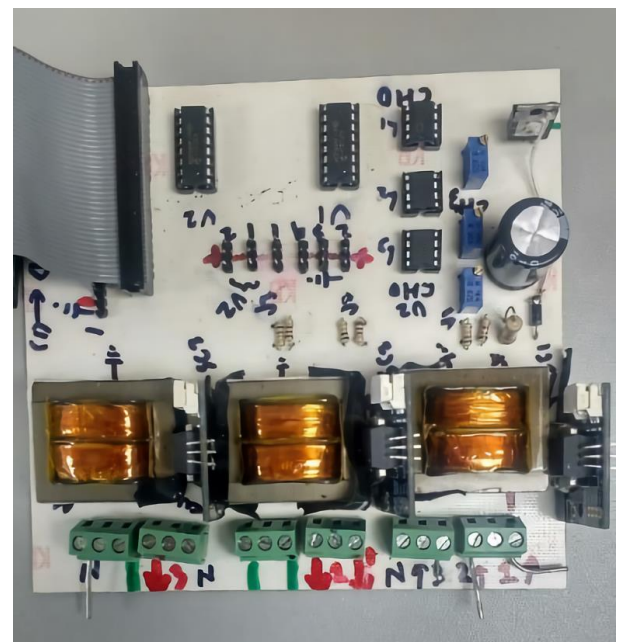


Figura 15 Tarjeta de adquisición de datos para el medidor bidireccional trifásico
Fuente: *Elaboración Propia*

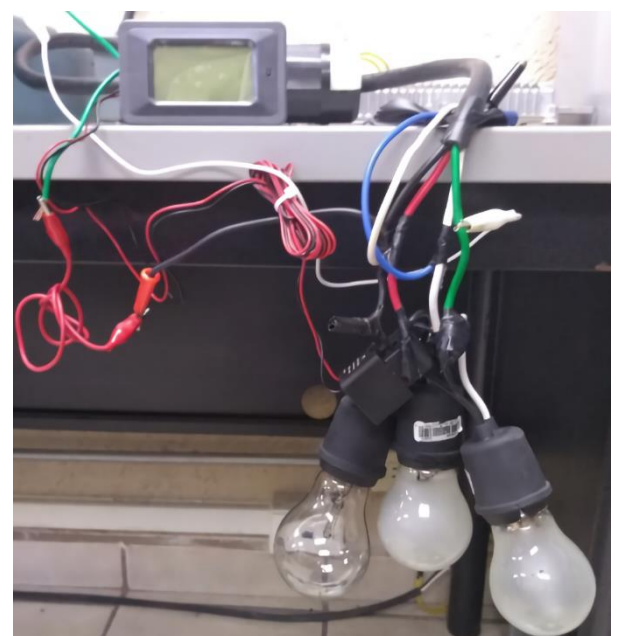


Figura 16 Conexión de lámparas como cargas monofásicas
Fuente: *Elaboración Propia*



Figura 17 Conexión de un medidor comercial para comparar con el medidor bidireccional
Fuente: Elaboración Propia

En la figura 18 se muestra la conexión de un motor trifásico y el uso de un medidor comercial de voltaje, corriente, potencia y factor de potencia.



Figura 18 Conexión de un motor trifásico al suministro de energía con el microinversor interconectado a la red.
Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 1 se muestran los resultados de las pruebas realizadas con lámparas incandescentes conectadas como cargas, una en cada línea trifásica.

Parámetros	CFE	Micro-inversor	Medidor comercial
Línea 1			
Vrms	132 V	132 V	132 V
Irms	0.08 A	0.5 A	0.58 A
Potencia (W)	10.44 W	65.27 W	75.79 W
Potencia (VA)	10.56VA	66VA	76.56VA
FP	0.989	0.989	0.99
Línea 2			
Vrms	131.8 V	131.8 V	132 V
Irms	0.51 A	0.5 A	1.01 A
Potencia (W)	66.5 W	65.17 W	132 W
Potencia (VA)	67.22VA	65.9 VA	133.3VA
FP	0.989	0.989	0.99
Línea 3			
Vrms	131.8 V	131.8 V	132 V
Irms	0.08 A	0.5 A	0.58 A
Potencia (W)	10.43 W	65.17 W	75.79 W
Potencia (VA)	10.54VA	65.9 VA	76.56VA
FP	0.989	0.989	0.99

Tabla 1 Mediciones con carga monofásica

En la tabla 2 se muestran las mediciones realizadas con un motor trifásico conectado como carga.

Parámetros	CFE	Micro-inversor	Medidor comercial
Línea 1			
Vrms	132 V	132 V	132 V
Irms	1.12 A	0.5 A	1.41 A
Potencia (W)	14.78 W	64.68 W	19.5 W
Potencia (VA)	147.8VA	66 VA	186.1VA
FP	0.1	0.98	0.1
Línea 2			
Vrms	131.8 V	131.8 V	132 V
Irms	1.2 A	0.5 A	1.64 A
Potencia (W)	23.73 W	62.61 W	36.8 W
Potencia (VA)	158.2VA	65.9 VA	216.5VA
FP	0.15	0.95	0.17
Línea 3			
Vrms	131.8 V	131.8 V	132 V
Irms	1.3 A	0.5 A	1.64 A
Potencia (W)	30.84 W	62.61 W	36.8W
Potencia (VA)	171.34	65.9VA	216.5VA
FP	0.18	0.95	0.17

Tabla 2 Mediciones con carga trifásica

En la figura 19 se muestran las gráficas de voltaje y corriente generadas en Python, a partir de las mediciones registradas por el medidor bidireccional, y en la figura 20 los valores obtenidos con un medidor comercial.

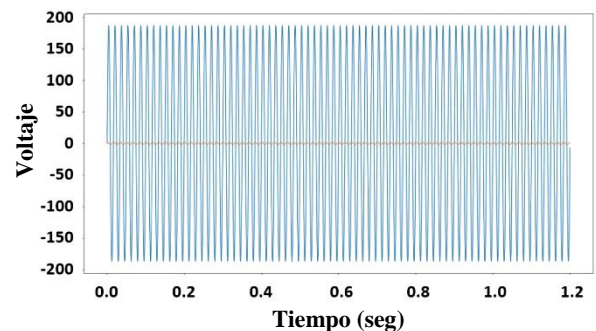


Figura 19 Gráficas del voltaje y la corriente de la línea 2 en el medidor trifásico

Fuente: Elaboración Propia



Figura 20 Mediciones registradas con un medidor comercial

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 21 se presenta una pantalla generada en Python para visualizar las mediciones por línea, registradas con el medidor bidireccional. En este caso, se pueden comparar con las mediciones realizadas, línea 2, con el medidor comercial (figura 20).

```

----- Línea 2 -----
Vrms: 131.995623
P: 55.501332
S: 191.383418
Angulo: 73.142000
Q: 183.158987
Irms: 1.449922
F.P: 0.290001
F: 60.000000

```

Figura 21 Pantalla generada en Python con los datos registrados por el prototipo del medidor bidireccional.

Fuente: *Elaboración Propia*

Conclusiones

El uso de nuevas tecnologías de la informática, la electrónica y el Internet de las cosas (*IoT: Internet of Things*), es fundamental para el desarrollo y actualización de propuestas relacionadas con proyectos alternativos para la generación de energía eléctrica.

Se realizó la conexión de un panel solar de 300W a un microinversor trifásico con corriente nominal de 2.5A de salida, para generar energía eléctrica en un sistema fotovoltaico interconectado a la red, en las instalaciones del laboratorio de electrónica del edificio de posgrado, en el Instituto Tecnológico de Hermosillo.

Para la medición de la corriente alterna generada por el conjunto panel-microinversor, y la corriente suministrada por la red a las cargas trifásicas y monofásicas, se utilizó el medidor bidireccional trifásico presentado en este artículo. Esto permitió validar las mediciones realizadas relacionadas con los principales parámetros del consumo energético (kWh), potencia activa, potencia reactiva y factor de potencia. El código desarrollado permite analizar y visualizar por separado estos parámetros, con la finalidad de presentar al usuario el costo neto a pagar por el consumo de energía (kWh), considerando la energía generada por el sistema fotovoltaico y la energía suministrada por CFE.

Los resultados de las pruebas realizadas y la validación de las mismas, utilizando un medidor comercial como patrón, permiten establecer en conclusión que se puede utilizar el medidor bidireccional en instalaciones residenciales e industriales para las mediciones eléctricas con la misma precisión que un medidor bidireccional utilizado actualmente por la compañía de suministro de energía eléctrica.

El desarrollo tecnológico propuesto para el medidor bidireccional es fundamental para el avance científico en el diseño y aplicación de nuevas tecnologías para la generación y gestión de energías renovables. La principal aportación sugerida por los resultados obtenidos, se basa fundamentalmente en el diseño de los circuitos de acondicionamiento de señal para la medición de voltaje y corriente, tanto generada como consumida por las cargas conectadas al sistema fotovoltaico interconectado a la red, así como un novedoso sistema para la conversión de las señales analógicas a digitales a través del protocolo SPI. Además, el código desarrollado en lenguaje Python presenta algunas funciones innovadoras para el tratamiento digital de las señales, para el cálculo de los parámetros eléctricos y su visualización en la pantalla de una computadora o aplicación móvil a través de comunicación WiFi (Wireless Fidelity).

Agradecimiento

Un agradecimiento muy especial al Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico de Hermosillo, por todo el apoyo proporcionado con las instalaciones para los trabajos de laboratorio y las pruebas realizadas al medidor bidireccional, y a la empresa Diseño e Ingeniería Sustentable por el apoyo económico para la compra de materiales y equipos a través del programa PEI (programa de estímulos a la innovación) de CONACYT.

5. Referencias

- [1] C. d. E. S. y. d. O. Pública, Energías renovables: evolución y objetivos en Estados Unidos y México, Cámara de diputados, 2016.
- [2] Solarcentury, Energía Solar, Estado Actual y Perspectivas, Solarcentury, 2015.
- [3] Prospectivas del Sector Eléctrico 2012-2026, Secretaría de Energía, México 2012.

- [4] Caicedo Gómez, S. (2019). Estudio técnico de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en la Universidad Piloto de Colombia como caso de estudio.
- [5] Lubo, U. D. (2019). Cargos de respaldo por uso de la red eléctrica en el costo unitario de energía distribuida: desafíos y oportunidades para la planificación. *Revista UIS Ingenierías*, 18(3), 67- 74.
- [6] H. Zhang, H-Bridge micro inverter grid-connected device. Estados Unidos Patente US20130242617 A1, 19 09 2013.
- [7] M. Fornage, Serially connected micro-inverter system having concertina output voltage control. Estados Unidos Patente US 20140084695 A1, 27 03 2014.
- [8] S. Collin, «Single chip grid connected solar micro inverter». Estados Unidos Patente US 2014 0112041 A1, 24 04 2014.
- [9] <http://calefaccion-solar.com/beneficios-de-un-medidor-bidireccional.html> (Consulta: 18 de septiembre de 2019).
- [10] <https://www.analog.com/en/products/ad623.html#product-overview> (Consulta: 20 de septiembre de 2019)
- [11] <https://www.digikey.com.mx/es/supplier-centers/a/allegro-microsystems> (Consulta: 20 de septiembre de 2019).
- [12] <https://www.digikey.com.mx/product-detail/es/microchip-technology/MCP3008-I-P/MCP3008-I-P-ND/319422> (Consulta: 20 de septiembre de 2019).
- [13] <https://www.adafruit.com/?q=raspberry> (Consulta: 23 de septiembre de 2019).