

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MEDIDOR TRIFÁSICO INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y ARMÓNICOS

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A THREE-PHASE ENERGY AND HARMONICS METER

José Farfán-Lira , Judith Betteta-Gómez , Bryam Armas-Sedano , Johann Navarro Solano 

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Recibido (Received): 20/02/2023

Publicado (Published): 20/12/2023

RESUMEN

La medición precisa de energía eléctrica resulta esencial para garantizar una tarificación equitativa, tanto para el cliente como para el distribuidor. En la actualidad, se reconoce la necesidad de medir parámetros más allá del consumo de energía activa, con el propósito de prevenir fallas en la instalación o diagnosticarlas una vez que se presenten. Además, si se permite el acceso de los datos de medición en tiempo real, permite que el usuario realice ajustes para optimizar el consumo de energía y prolongar la vida útil de la instalación. El objetivo de este estudio consiste en diseñar un dispositivo inteligente de medición de energía trifásica orientado al registro de parámetros eléctricos, que no solo mida de manera precisa la energía activa, sino también parámetros relacionados con la calidad de la energía. Esto se hace con la finalidad de cumplir con los estándares de calidad establecidos en las normas IEC. La implementación física del dispositivo se basa en la interconexión de equipos modulares comerciales y circuitos especialmente diseñados para este proyecto. Para abordar la limitada velocidad de muestreo del microcontrolador, se emplean métodos de submuestreo en la programación. La comunicación remota se logra mediante la plataforma BLINK, ampliamente utilizada en proyectos de Internet de las cosas (IoT). La validación de la medición de energía se lleva a cabo mediante una prueba de contraste conforme a los lineamientos detallados en la norma IEC 62053-21, lo cual conduce a una clasificación de clase 1 para el dispositivo. Asimismo, se valida la precisión de la medición del resto de parámetros mediante la comparación con un analizador de redes, cumpliendo los criterios establecidos en la norma IEC 61557-12. Ambas pruebas se realizan en el laboratorio N°6 de electricidad de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

Palabras Clave: medidor de energía, medición inteligente, armónicos, submuestreo, diseño de instrumento

ABSTRACT

The accurate measurement of electrical energy is essential to ensure equitable tariff assessment for both the customer and the distributor. Currently, there is a recognized need to measure parameters beyond active energy consumption in order to prevent or diagnose installation faults. Furthermore, providing real-time access to measurement data enables users to make adjustments for energy optimization and prolong the lifespan of the installation. The objective of this study is to design an intelligent three-phase energy measurement device focused on recording electrical parameters. This device aims to precisely measure not only active energy but also parameters related to energy quality, in order to comply with quality standards established in IEC norms. The physical implementation of the device relies on interconnecting commercial modular equipment and circuits specially designed for this project. To address the microcontroller's limited sampling rate, sub-sampling methods are employed in the programming. Remote communication is achieved through the widely used IoT platform, BLINK. Energy measurement validation is conducted through a contrast test in accordance with the guidelines outlined in IEC 62053-21, resulting in a Class 1 classification for the device. Furthermore, the accuracy of the measurement of other parameters is validated by comparing it with a power analyzer, meeting the criteria established in IEC 61557-12. Both tests are carried out in Laboratory No. 6 of Electricity at the Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

Keywords: energy meter, smart metering, harmonics, undersampling, instrument design

1. INTRODUCCIÓN

La medición de energía eléctrica desempeña un papel fundamental al permitir la facturación precisa de este recurso esencial. En el ámbito residencial, se requiere un proceso de medición extensivo que abarque la zona de concesión del proveedor de servicios, en este contexto, se emplean mayoritariamente medidores electromecánicos continuamente reemplazados por medidores estáticos [1], también conocidos como medidores electrónicos. Estos dispositivos, caracterizados por su diseño simplificado, tienen la tarea de registrar únicamente el consumo de energía activa [2]. El registro acumulado de dicho consumo se realiza mediante sistemas de lectura manual-visual o manual-remota, en ambos casos se requiere el desplazamiento de personal hacia los medidores de energía para realizar el registro, el primero el registro es en papel y el segundo usa alguna aplicación web para esto [3].

Por otro lado, en el contexto industrial, las necesidades de medición son más complejas y detalladas, lo que demanda la utilización de medidores inteligentes. Estos dispositivos avanzados no solo requieren cuantificar la energía activa, sino que también deben capturar datos relevantes como la potencia y la energía, tanto activa como reactiva en intervalos de al menos 15 minutos [4]. Toda esta información es crucial para el entendimiento y la gestión del consumo energético en entornos industriales, donde la eficiencia y la optimización juegan un papel crucial [5].

La comunicación remota es otra característica importante de los medidores inteligentes [6]. La implementación de sistemas de comunicación abre una ventana hacia la mejora en la recopilación de datos, permitiendo una transición fluida hacia sistemas de medición más modernos y automatizados como la lectura de medición automática [7], La infraestructura de medición avanzada [8] y las redes inteligentes [9]. Cabe destacar que diversas empresas concesionarias de distribución en el Perú han instalado medidores inteligentes en algunas zonas residenciales, principalmente para aprovechar los beneficios de la comunicación remota [10][11].

La visibilidad del consumo de energía se ha convertido en una herramienta poderosa para los usuarios residenciales, haciendo posible un mayor control sobre el uso de sus electrodomésticos y otras cargas [12]. Esta capacidad de observar el consumo en tiempo real no solo promueve una toma de decisiones más informada en términos de eficiencia

energética, sino que también incentiva la adquisición de equipos más eficientes, contribuyendo así al ahorro energético y la reducción del impacto ambiental [13].

La información sobre la calidad de la energía también adquiere importancia en este contexto más amplio. Los proveedores de servicios eléctricos pueden utilizar estos datos para identificar y tomar medidas contra aquellos usuarios que generen armónicos [14]. Además, permite la detección temprana de desbalances de corriente, lo que a su vez ayuda a prevenir sobrecargas en las instalaciones eléctricas [15] y robos de energía [16].

Este artículo presenta el diseño de un medidor de energía inteligente, cuyo objetivo es registrar las mediciones esenciales tanto para la tarificación como para evaluar la calidad de la energía del cliente (armónicos y valores eficaces de corriente y tensión). La evaluación de la calidad del producto se lleva a cabo mediante la determinación de su clase de precisión, siguiendo los estándares internacionales de la IEC 61557-12 [17], donde figura el criterio para la determinación de la clase de los medidores de energía activa, e IEC 62053-21 [18], donde figura el criterio para determinar la clase de las demás magnitudes del medidor.

Dado que el diseño está enfocado en la accesibilidad económica y su creación a partir de componentes modulares de uso general, se anticipa que este dispositivo no podrá superar las especificaciones de los dispositivos comerciales [19], [20] ni diseñados exclusivamente para esta finalidad [21] y que tampoco cumplirá con los estándares de la norma IEC 61000-4-30 [22] orientada a definir y clasificar a los analizadores de calidad de energía.

2. ANTECEDENTES

En relación al desarrollo de medidores de energía, existe una serie de antecedentes documentados. En esta sección, se abordan y clasifican algunos de estos trabajos que han servido como fundamentos para el presente estudio.

En el ámbito constructivo de los medidores, es posible distinguir diferentes enfoques según los módulos microcontroladores empleados. Entre las alternativas más comunes se encuentran el Arduino UNO [23] [24], Arduino Mega [25], [26] inclusive en combinación con sensores de energía como el PZEM-004T [27], los cuales requieren de módulos adicionales para enviar su información a un servidor. Otras alternativas son los módulos con microcontroladores Esp32 [28]–[30] y Esp8266 [31]–

[33] que permiten comunicación remota por Wifi. Se han identificado también proyectos donde se enfocan exclusivamente en el diseño del medidor para un suministro [23][25][26][31], mientras que en otros casos se desarrollan sistemas para centralizar las mediciones de varios dispositivos, donde destacan aquellos que usan el Raspberry PI para este propósito por su gran cantidad [27], [34]–[37]. Una clasificación adicional recae en la elección de la tecnología de comunicación. Al considerar únicamente los antecedentes que emplean comunicación inalámbrica, se puede subdividir en categorías como el uso de Zigbee [24], WiFi[37][28][31]. En relación a la interfaz web usada para llevar la recolección de datos del medidor, se ha observado el uso de plataformas BLYNK [29][33] y ThinkSpeak [38], así como el diseño de plataformas web específicamente adaptadas al proyecto [24][34].

En términos de validación, los proyectos presentan diferencias. Algunos incluyen comparaciones con otros dispositivos de medición [25][36] o con cargas patrón [27], para respaldar su efectividad, mientras que otros no se muestra una validación como tal sino solo resultados de sus mediciones [26][28][38][30]–[32].

Dentro de los trabajos mencionados, cabe indicar que el presente medidor usa un módulo microcontrolador basado en el ESP32, utiliza la comunicación inalámbrica vía WiFi, se encuentra vinculada a la plataforma BLYNK para el registro de datos. A diferencia de los trabajos mencionados los errores de medición obtenidos son evaluados según indican las normas IEC 62053-21 y IEC 61557-12 y comparados con los límites indicados en éstas.

3. METODOLOGÍA

El presente estudio se dedica a la elaboración de un medidor de energía inteligente orientado a sistemas trifásicos. A pesar de su capacidad de adaptación a distintas tensiones y corrientes, se ha concebido este diseño considerando un punto de suministro de 220 V y 5 A nominales. El valor intrínseco de este dispositivo se encuentra en su aptitud para registrar mediciones de: frecuencia, potencia y energía tanto activa como reactiva, valores eficaces de tensiones y corrientes, así como sus armónicos (se ha considerado hasta el vigesimonoveno) y THD. Finalmente, se explican los aspectos principales de las normas internacionales usadas para validar el diseño, siendo estas la IEC 62053-21 y IEC 61557-12.

3.1. Equipamiento físico del medidor

El proceso de medición se resume en el esquema de la Fig. 1, en este se observa que el medidor requiere la adquisición de las tres tensiones y corrientes de

línea que configuran el sistema trifásico. Además, estas señales deben someterse a un proceso de adecuación con el propósito de obtener tensiones dentro del rango legible para el conversor analógico a digital (ADC). En este contexto, resulta indispensable introducir una tensión de "offset" que asegure que las señales de entrada al ADC se mantengan invariablemente en el rango positivo, garantizando así su correcta cuantificación.

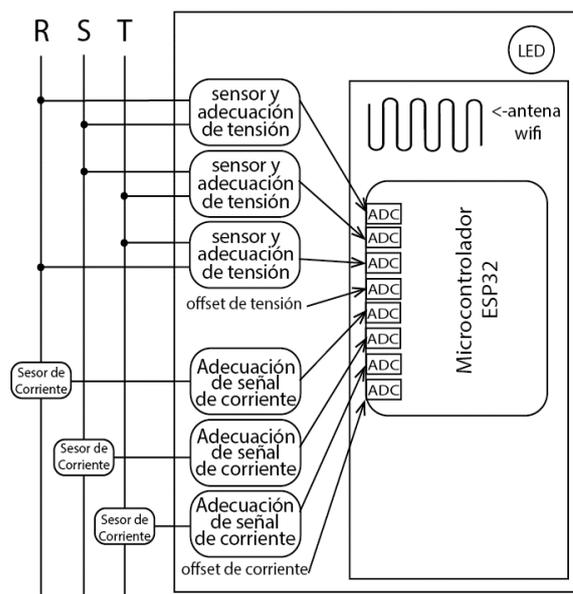


Fig. 1. Esquema del proceso de medición electrónica

Otro aspecto a considerar es la inexistencia de una pantalla local que actúe como interfaz de salida directa. En su lugar, se ha implementado una interfaz web y un LED que se emplea principalmente para actividades de calibración. Estas consideraciones subrayan la orientación del diseño hacia la accesibilidad remota y la interacción a través de plataformas digitales.

3.1.1. Sensor y adecuación de tensión

Las señales de tensión son adquiridas y adecuadas por el módulo ZMPT101B [8], mostrado en la Fig. 2. Este módulo está diseñado para recibir una tensión eficaz nominal de 250 V, la cual es adecuada a una señal de 1.665V de amplitud y desplazada con una tensión de offset de 1.665V.

3.1.2. Sensor de corriente

El proceso de conversión de las corrientes de línea en señales de tensión se realiza mediante el empleo de un transformador de corriente de núcleo partido, específicamente el modelo SCT013, como se exhibe en la Fig. 2. Dicho sensor presenta una relación nominal de 30A/1V eficaces, este dispositivo integra una resistencia por la cual circula la corriente del secundario, permitiendo así la obtención de la tensión requerida. Para alinearse con las características predefinidas del medidor, resulta esencial la adición

de 6 espiras en la parte exterior del primario, con el objetivo de lograr una relación modificada de 5A/1V.



Fig. 2. Módulo ZMPT101B (izquierda) y Módulo SCT013 (derecha)

3.1.3. Adecuación de corriente

Se diseña un circuito con el propósito de transformar las señales alternas de amplitud nominal 1.4142V provenientes de los sensores SCT013 en señales adecuadas para la conversión analógica a digital. Este proceso se lleva a cabo mediante la implementación del amplificador de instrumentación INA128. La ganancia de este componente depende de la resistencia conectada entre los terminales 1 y 8. La Fig. 3 muestra que los terminales 1 y 8 se mantienen sin conexión debido a que no se requiere una amplificación, ya que la amplitud máxima admitida es de 1.665V, y la señal generada por el sensor SCT013 permanece dentro de este intervalo.

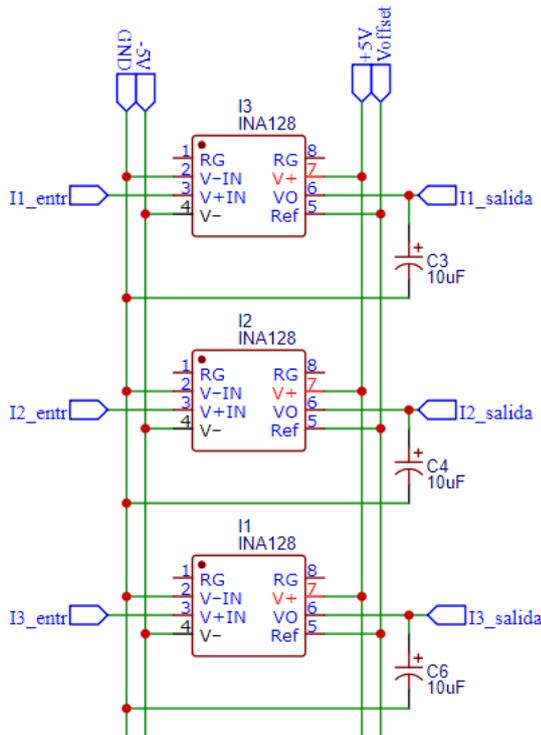


Fig. 3. Circuito de adecuación de corriente

La tensión de offset (V_{offset}) se introduce a todas las señales de corriente a través del terminal 5 de los dispositivos INA128, visibles en la Fig. 3. Esta tensión de offset se origina en el circuito integrado REF2033, el cual se alimenta con 5V y en el terminal 1 se obtiene una tensión de 1.665V, como se observa en la Fig. 4.

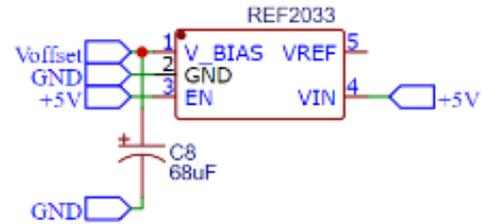


Fig. 4. Circuito de tensión de offset

En los circuitos de la Fig. 3 y Fig. 4 se muestran condensadores de 10µF y 68µF, estos son útiles para filtrar variaciones de tensión de alta frecuencia generadas en los dispositivos electrónicos y que podrían afectar la lectura.

3.1.4. ADC

Se hace uso de los ADC incorporados en el microcontrolador ESP32, cuyo intervalo de medición abarca desde 0 hasta 3.33V. El ADC presenta una resolución de 12 bits y una tasa de muestreo de 10,000 muestras por segundo (sps). Se procede a la multiplexación en ocho entradas, de las cuales seis se asignan para las señales de tensión y corriente, y dos se destinan a las tensiones de offset tanto de tensión como de corriente. Esto culmina en una velocidad efectiva de muestreo de 1250 sps. Consecuentemente, en cada ciclo eléctrico correspondiente a una frecuencia de 60Hz, se generan veinte lecturas por período. Este valor es pequeño especialmente para obtener los armónicos hasta el vigesimonoveno, por lo que es necesario un procesamiento adicional explicado en la etapa de programación, sección 3.2.2 y 3.2.3 de este trabajo.

El registro de los valores de offset, tanto para tensión como para corriente, es importante debido a las sutiles variaciones que experimentan durante el proceso de medición.

3.1.5. Módulo Microcontrolador

El ESP32 es un microcontrolador de doble núcleo. Cuenta con capacidades para la comunicación inalámbrica a través de Wi-Fi y Bluetooth. Este dispositivo se encuentra integrado en el módulo ESP32-DOIT-DEVKIT-V1, el cual también incluye otros componentes como una conexión micro-USB, un oscilador de cristal de cuarzo, LEDs, antena, conectores estandarizados, entre otros.

3.1.6. Alimentación

Los dispositivos del presente diseño requieren dos tipos de alimentación, el circuito de adecuación de señal de corriente requiere una tensión dual de +/- 5V y los ZMPT101B, el REF2033 y el ESP32 requieren alimentación DC de 5V. Ambos tipos de alimentación se consiguen conectando dos fuentes de tensión DC de 5V en serie como se muestra en la Fig. 5.

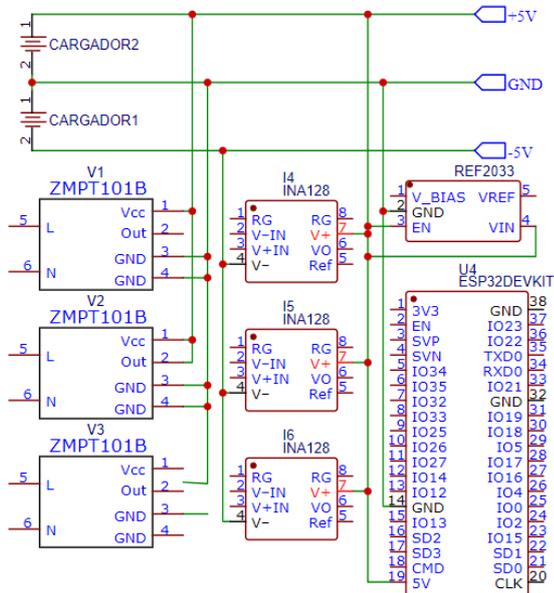


Fig. 5. Alimentación de Dispositivos

3.1.7. Led indicador

Se conecta un led color rojo para ser utilizado en la etapa de validación, este está conectado en serie a una resistencia de 200 ohm para controlar la corriente que pasa por él y se alimenta con un terminal de salida digital del módulo ESP32.

En este diseño específico del medidor, se ha considerado una constante de 950 pulsos por KW-h, valor que resulta inferior al de medidores comerciales. Esta elección trae consigo una ventaja significativa, un intervalo temporal más prolongado entre los pulsos del LED. Como resultado directo, se logra minimizar la influencia del tiempo de procesamiento, particularmente el asociado con la Transformada Rápida de Fourier (FFT), en las pruebas destinadas a determinar la clase de precisión del medidor.

3.1.8. Placa PCB

La Fig. 6 muestra la placa diseñada para ubicar a los dispositivos detallados en los párrafos anteriores, todos ubicados en la cara frontal de la misma.

Las conexiones se ejecutan empleando dobles a un ángulo de 45°. Para el grosor de las conexiones y el espaciado, se establece una dimensión de 0.4 mm, garantizando así una disposición precisa y eficiente.

En esta implementación particular, se opta por una disposición integral de la conexión a tierra del sistema de medición en toda la parte posterior de la placa. Esta elección se fundamenta en la facilitación del acceso desde varios puntos y en la protección ante la exposición a campos electromagnéticos.

En la Fig. 6 se distinguen diferentes conexiones, las cuales son: (1) Adecuación de tensión, (2) Adecuación de corriente, (3) Conexión de los sensores de corriente, (4) Circuito de tensión de referencia 1.665V, (5) Conexión de alimentación dual (6) Circuito de led y (7) Conexión de modulo ESP32-DOIT-DEVKIT-V1

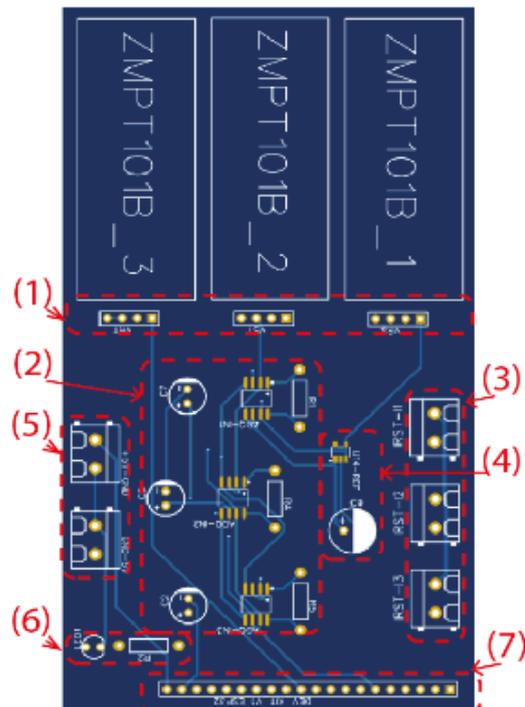


Fig. 6. Placa PCB para medidor

3.1.9. Esquema del medidor

La Fig. 7 tiene por objetivo mostrar la conexión del medidor, así como la conexión de todos los dispositivos mencionados sobre la placa PCB.

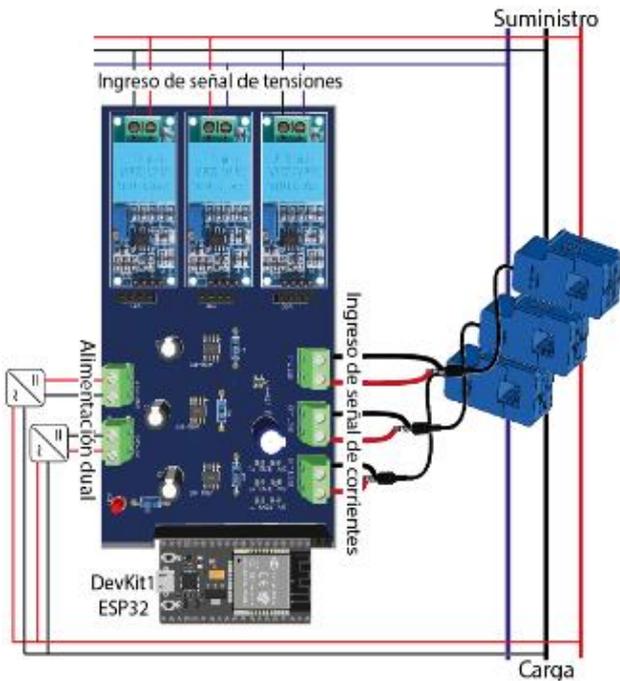


Fig. 7. Esquema de conexión del medidor

3.2. Programación del medidor

La programación del dispositivo de medición se orienta hacia el cálculo de "ondas promedio", las cuales constituyen un conjunto de datos correspondiente a un período eléctrico y que representan un equivalente de los datos registrados en un intervalo de análisis de 50 periodos consecutivos. Estas "ondas promedio" sirven como base para los cálculos previstos en el proceso.

Este proceso de programación se segmenta en cuatro etapas, que se presentan de manera general en el diagrama de flujo representado en la Fig. 8.

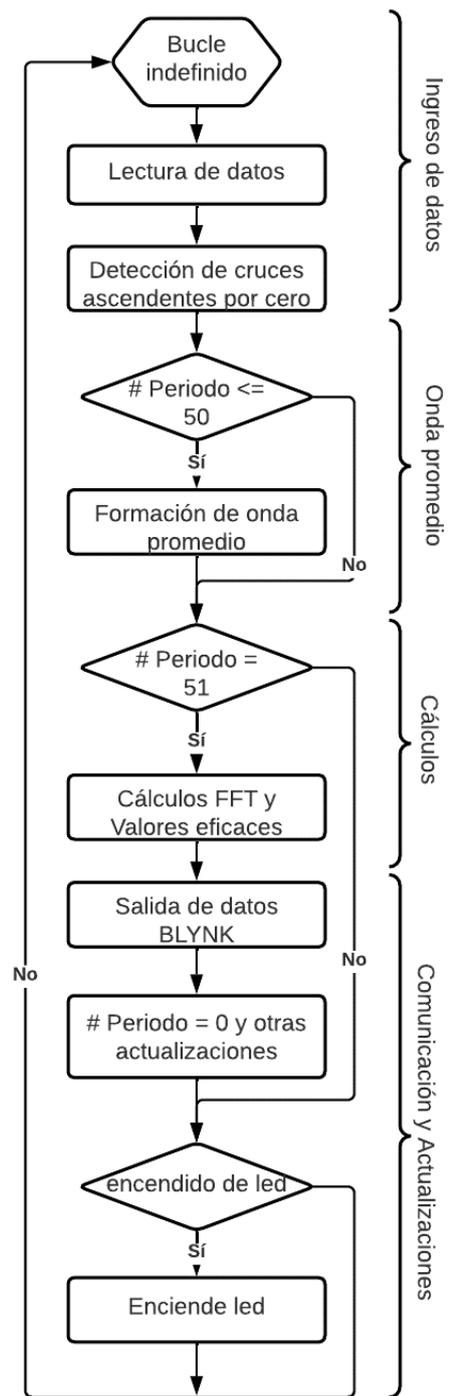


Fig. 8. Diagrama de Flujo

3.2.1. Ingreso de datos

El bucle continuo es necesario para llevar a cabo el proceso de muestreo a una frecuencia de 1250 muestras por segundo (sps) en cada canal analógico, lo cual equivale a intervalos temporales nominales de 0.8 ms. Los resultados adquiridos a través de los convertidores analógico a digital (ADC) requieren un procesamiento que los calibre con los valores reales en el punto de medición, tanto para corriente como para tensión. Dicho procesamiento inicia con la sustracción del valor de offset, que ha sido capturado igualmente mediante dos ADC en las fases de adecuación tanto de tensión como de corriente, así

así mismo los valores leídos deben multiplicarse por un factor que relacione la magnitud de los parámetros eléctricos del suministro con los valores de registro correspondientes a los 12 bits de ADC.

El registro de las tensiones de offset es importante, ya que ésta no se mantiene inmutable en su totalidad, y sus oscilaciones impactan en los valores resultantes del proceso de adecuación.

Se efectúa la detección de cruces ascendentes por cero con el fin de llevar a cabo el conteo de los períodos necesarios para la creación de la onda promedio y para calcular la frecuencia promedio durante el intervalo de análisis.

3.2.2. Onda promedio

La formación de la onda promedio se desarrolla mediante la categorización de los datos registrados en función de su posición dentro del período.

Para este propósito, se divide el período en un número específico de intervalos de donde se obtendrá un valor promedio por intervalo. La elección de este número está relacionada con la cantidad de armónicos requeridos, particularmente se apunta a alcanzar hasta el armónico número 29. En consonancia con el principio de Nyquist [39], se requiere al menos el doble de datos como mínimo para este propósito. Siguiendo este razonamiento, se opta por dividir la onda promedio en 90 intervalos de 0.185ms.

El cálculo de la cantidad mínima de períodos necesarios para generar información en estos 90 intervalos se basa en que, la diferencia temporal entre dos intervalos es el complemento del residuo resultante de la división entre el período y el intervalo de muestreo [40]. En consecuencia, es posible emplear la fórmula (1) para determinar la cantidad de ondas superpuestas que posibilitan un espaciado uniforme.

$$S = \frac{m}{m - T(\text{mod})m} \quad (1)$$

Donde: S es la cantidad de ondas superpuestas, m es el intervalo de muestreo, T es el Período y (mod) es el operador residuo tal que $A(\text{mod})B$ es el residuo de dividir A entre B .

En un escenario con un período estándar de 16.666 ms y un intervalo de muestreo de 0.8 ms, se obtiene $S=6$. En estos 6 períodos, se registran 120 datos con un espaciado de 0.138 ms entre ellos, lo que garantiza que cada uno de los 90 intervalos al menos contenga un dato. No obstante, se opta por considerar 50 períodos, con el objetivo de asegurar

un mínimo de 8 datos por intervalo en condiciones nominales. Es importante señalar que este número será aproximado debido a las variaciones inherentes en la frecuencia eléctrica real y en la velocidad de muestreo durante el funcionamiento del ESP32.

Los valores registrados en cada intervalo se promedian para obtener un solo valor representativo, además en el supuesto caso de observarse algún intervalo vacío, este debe de llenarse con el promedio de sus intervalos anterior y posterior.

3.2.3. Cálculos

Al iniciar el periodo número 51 se procede a realizar los cálculos necesarios a partir de las ondas promedio almacenadas, tanto de tensión como de corriente.

Los valores eficaces de cada corriente y tensión se calculan a partir de las fórmulas (2)

$$X = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n]^2} \quad (2)$$

Donde: N es la cantidad total de datos en el presente caso 90, n es un contador de los elementos de la onda promedio y x es la magnitud, aplicable a las tres corrientes y tres tensiones.

En el proceso de cálculo de las potencias, se debe considerar que las tensiones registradas corresponden a un sistema en configuración delta, mientras que las corrientes corresponden a un sistema en configuración estrella. La forma más directa y simplificada de calcular las potencias consiste en determinar las ondas promedio de corrientes equivalentes de un sistema en configuración delta mediante la sustracción ordenada de los elementos de cada par de corrientes como se muestra en (3).

$$I_{RS}[n] = I_S[n] - I_R[n] \quad (3)$$

Posteriormente, se emplea la fórmula (4) para calcular la potencia activa monofásica.

$$P_{RS} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_{RS}[n] \cdot i_{RS}[n] \quad (4)$$

La potencia aparente monofásica se obtiene a partir de los valores eficaces como indica la formula (5).

$$S_{RS} = V_{RS} \cdot I_{RS} \quad (5)$$

Y la potencia reactiva monofásica se obtiene mediante la fórmula mostrada en (6), la cual se encuentra afectada por el factor de distorsión, resultado de los armónicos de corriente.

$$Q_{RS} = \sqrt{S_{RS}^2 \cdot FD_{RS}^2 - P_{RS}^2} \quad (6)$$

El factor de distorsión se define como se indica en (7), a partir de la distorsión armónica total de corriente de fase calculada a partir de dos corrientes de línea.

$$FD_{RS} = \frac{1}{\sqrt{THDi_{RS}^2 + 1}} \quad (7)$$

Finalmente, el factor de potencia de cada fase se muestra en (8).

$$PF_{RS} = \frac{P_{RS}}{S_{RS} \cdot FD_{RS}} \quad (8)$$

Es relevante señalar que las fórmulas desde la (3) hasta la (8) se presentan para la fase RS; sin embargo, el mismo procedimiento debe replicarse para las fases ST y TR pues la potencia trifásica activa y reactiva es la sumatoria de las 3 mencionadas.

Y el factor de potencia trifásico se obtiene del promedio de los 3 factores de potencia monofásicos como se muestra en (9).

$$PF = \frac{PF_{RS} + PF_{ST} + PF_{TR}}{3} \quad (9)$$

La energía activa se calcula considerando que la potencia es constante durante los 50 periodos de medición y el tiempo de cálculo, este valor se acumula durante el tiempo en que el medidor se encuentra encendido y se usa para el control de led de medición.

En relación con la frecuencia, esta se determina a partir del promedio del periodo en el intervalo de medición. Para obtener este valor, se calcula dividiendo la diferencia de tiempo entre el último y el primer cruce ascendente por cero entre el número de periodos registrados, que en este caso es 50.

Finalmente, se procede al cálculo de los armónicos de las tres tensiones y tres corrientes, hasta el 29no a partir de los datos obtenidos de las ondas promedio. Para lograr esto, se utiliza la Transformada Rápida de Fourier (FFT), una técnica desarrollada por Cooley et al. [41] que permite analizar con eficiencia las componentes frecuenciales de una señal. La fórmula se muestra en (10) de modo general para una magnitud X y número de armónico k .

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

La THDi mencionada en (7) se calcula a partir de las componentes armónicas calculadas mediante la FFT mediante (11), se hace el mismo procedimiento para la tensión.

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_h^2 (I_h)^2}}{I_1} \quad (11)$$

3.2.4. Comunicación y actualizaciones

La comunicación se realiza mediante la plataforma BLYNK, ésta es una plataforma creada para complementar fácilmente proyectos de IoT o internet de las cosas, permitiendo la comunicación bidireccional entre una interfaz personalizable, que permite visualizar distintas variables desde una PC o Smartphone y un módulo programable conectado con la nube vía wifi. En su versión gratuita permite la conexión de dos módulos y el registro de datos durante 7 días sin posibilidad de un análisis directo en plataforma.

Para la presente experiencia se requiere que el microcontrolador ESP32 funcione como cliente brindando la información registrada en una comunicación unidireccional hacia la plataforma ubicada en la nube a través del *access point* o router como se muestra en la Fig. 9. El envío de información se realiza aproximadamente una vez cada segundo.



Fig. 9. Arquitectura de ESP32 como cliente

En relación a las actualizaciones de datos, después de transmitir los valores a través de la plataforma BLYNK, es necesario restablecer a cero todos los resultados derivados de sumatorias anidadas y actualizar el valor del período del sistema para el cálculo de la próxima onda promedio. El uso de sumatorias anidadas en el cálculo de valores eficaces y componentes armónicas reduce el uso de memoria dentro del proceso, pues solo se almacena el resultado final o parcial necesario.

3.3. Normas internacionales

Las normas internacionales son usadas para determinar la clase del medidor en las diferentes magnitudes a registrar.

3.3.1. IEC 62053-21

La norma IEC 62053-21, Equipos de medición de electricidad - Requisitos específicos - Medidores estáticos de energía activa de CA (Clases 0.5, 1 y 2), detalla las pruebas necesarias para verificar la categoría de precisión de un medidor de energía activa, en comparación con un equipo patrón. Además de estas pruebas, se incluyen evaluaciones de aislamiento, arranque y vacío. En esta norma se establecen las clases 0.5 y 1 para los medidores electrónicos, así como la clase 2 para los medidores electromecánicos. Las clases especiales, como 0.5s, 0.2s y 0.1s, se encuentran especificadas en la norma IEC 62053-22.

La prueba de contraste, donde se determina o comprueba la clase del medidor, requiere la conexión del circuito mostrado en la Fig. 10.

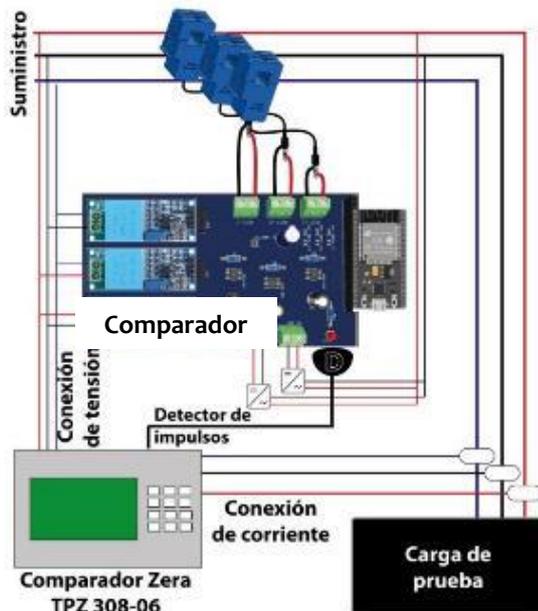


Fig. 10. Circuito de prueba según IEC 62053-21

La carga de prueba ilustrada en la Fig. 10 es una carga ajustable en términos de tensión y corriente, el cual se adapta manualmente a las características nominales del equipo. Para la comparación y validación, se emplea el equipo TPZ 308-06, que conforma el comparador y medidor patrón, con una precisión de clase 0.1, de la marca Zera. Este comparador se encarga de contrastar las lecturas captadas por el detector de impulsos con las mediciones de energía del medidor patrón integrado.

3.3.2. IEC 61557-12

La norma IEC 61557-12, Seguridad eléctrica en sistemas de distribución de baja tensión de hasta 1000 V CA y 1500 V CC – Para pruebas, medición o monitorización de medidas de protección; por su parte, sitúa al equipo diseñado en este trabajo en la categoría de "performance measuring device" (PMD)

o dispositivo de medición de rendimiento eléctrico, dado que solo abarca la medición de ciertos parámetros de calidad de energía. En esta norma se establecen las clases como múltiplos del error de medición del PMD en relación con un equipo de referencia.

Con el propósito de determinar los errores de medición, y con ello la clase, se implementó el circuito representado en la FIG. 11 y se seleccionó el medidor Fluke 435-II como referencia patrón. En este montaje, tanto el medidor desarrollado como el medidor patrón son sometidos a una fuente trifásica de 220V y 60Hz y a diversas cargas según la magnitud a medir.

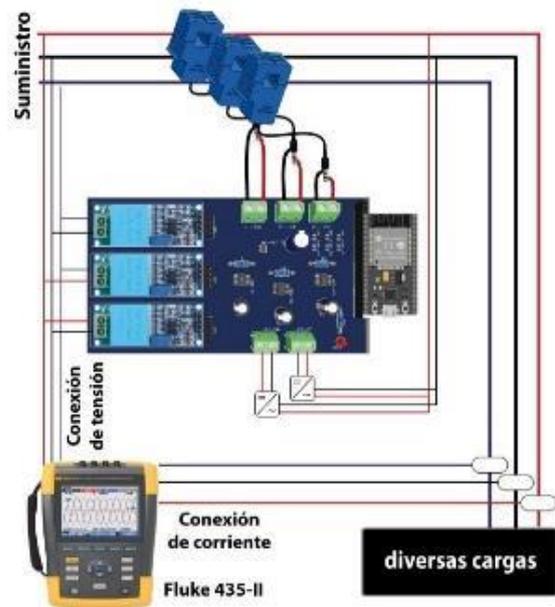


FIG. 11 Circuito para determinación de clase de medición según IEC 61557-12

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Descripción del equipo medidor de energía

La Fig. 12 muestra el equipo de medición implementado.

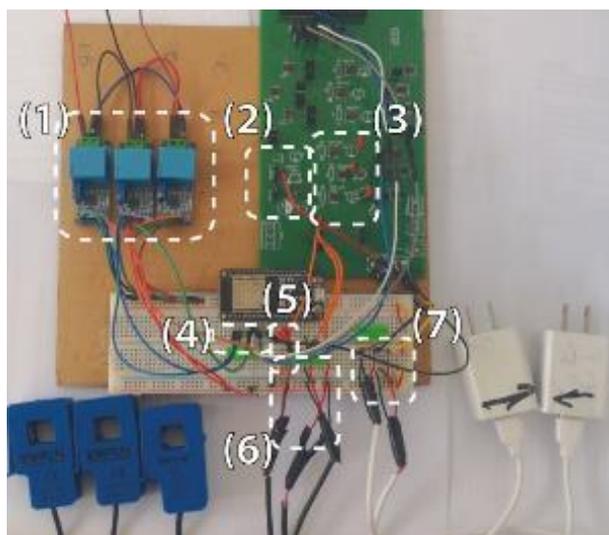


Fig. 12 Equipo de medición implementado

Los elementos enumerados en la Fig. 12 son los siguientes: (1) Sensores de tensión, (2) Circuito de tensión de offset para corriente, (3) Circuito de adecuación de corriente, (4) Entrada de señales adecuadas a Dev Kit 1 ESP32, (5) Circuito de Led, (6) Alimentación y (7) Entrada de sensores de corriente.

Cabe destacar que la tarjeta PCB mostrada contiene una mayor cantidad de dispositivos electrónicos a los necesarios para este proyecto, estos han sido utilizados en la evaluación de diferentes alternativas de circuitos de medición y de otros proyectos afines.

4.2. Lectura remota del medidor

Se adaptó la plataforma BLYNK.io para recopilar la información del medidor, La interfaz gráfica usada es la mostrada en la Fig. 13.

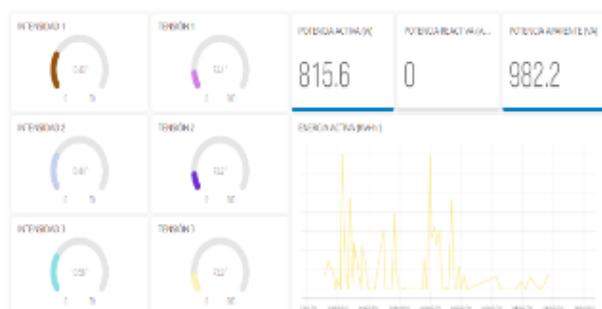


Fig. 13 Interfaz de plataforma BLYNK

4.3. Pruebas según norma IEC 62053-21

Con el objetivo de efectuar esta evaluación, se emplea el accesorio de fotodetección integrado en el equipo patrón, permitiendo así la captura de los registros de energía activa, con una constante de 950 impulsos por kilovatio-hora (KW-h). Se selecciona un punto de suministro trifásico a 220V y se ajustan los parámetros la carga de acuerdo con las indicaciones

presentes en la Tabla 3 de la norma en cuestión. Es importante resaltar que, debido a la disponibilidad en el laboratorio, solo se pudo utilizar una carga resistiva, lo que limitó la evaluación a un factor de potencia unitario.

Como resultado de las circunstancias mencionadas, se evaluaron los dos primeros casos de la tabla 3 de la norma en cuestión. En el rango de corrientes entre 5A y 0.5A, se registró un error máximo de 0.9% a lo largo de todo el intervalo. Para el intervalo de corrientes entre 0.5A y la mínima considerada, 0.1 A, se obtuvo un valor máximo de error del 1.3%. Estas cifras demuestran que el medidor se ajusta a los requisitos de la clase 1 según lo estipulado en la norma de referencia.

La Fig. 14 exhibe la lectura del equipo patrón, mostrando un error máximo del 0.9%, que corresponde al error máximo encontrado en el primer rango mencionado.



Fig. 14 Pantalla de patrón Zera TPZ 308-06

4.4. Pruebas según normas IEC 61557-12

Realizando una comparación entre las mediciones efectuadas utilizando el medidor desarrollado en este proyecto y el medidor de referencia Fluke 345-II, se llevaron a cabo los cálculos de los errores de medición. Estos resultados se detallan en la TABLA I. En todas las instancias, se emplea el suministro trifásico estándar de 220V y 60Hz, presente en el Laboratorio de Electricidad No. 6 de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

TABLA I
Clases de precisión para los parámetros analizados

Parámetros	Valor Medio Medidor	Valor Medio Patrón	Error porcentual	Clase de medición
Potencia activa	217.576	215.656	0.89%	1
Potencia reactiva	208.539	206.066	1.20%	1.5
Potencia aparente	296.173	292.314	1.32%	1.5
Factor de potencia	0.724	0.723	0.12%	1.5
Frecuencia	59.892	60.00	0.18%	1
Tensión eficaz	218.67	220.1	0.65%	1
Corriente eficaz	1.338	1.328	0.75%	1
THD de voltaje	0.0101	0.0100	0.70%	2.5
THD de corriente	0.2045	0.2031	0.70%	2.5

Nota: datos obtenidos mediante comparación entre patrón y medidor implementado.

En el contexto de medición de potencia activa, reactiva, aparente, el factor de potencia y la corriente eficaz, se optó por una carga de un motor industrial trifásico de 4 HP. En la evaluación de frecuencia, tensión eficaz y el nivel de distorsión armónica total (THD) de voltaje, la fuente de tensión se mantuvo sin carga. Para el análisis de la THD de tensión, los valores registrados fueron mínimos y principalmente influenciados por armónicos de 5ta y 7ma. Por último, para la THD de corriente, se usó como carga un rectificador trifásico conectado a una resistencia.

5. DISCUSIÓN

Esta sección tiene como objetivo realizar una comparativa entre las clases de medición del dispositivo desarrollado en este estudio y las de varios equipos comerciales. Para llevar a cabo esta comparación, se ha elegido el modelo M1M 15 [20] de la marca ABB y el modelo PowerLogic ION7410 [19] de Schneider.

TABLA II
Comparación de clases de precisión

Parámetros	Equipo implementado	M1M 15	PowerLogic ION7410
Energía activa ⁽¹⁾	1	0.5 S	0.2 S
Potencia activa ⁽²⁾	1	0.5	--
Potencia reactiva ⁽²⁾	1.5	2	--
Potencia aparente ⁽²⁾	1.5	1	--
Factor de potencia ⁽²⁾	1.5	--	0.5
Frecuencia ⁽²⁾	1	0.1	0.2
Tensión eficaz ⁽²⁾	1	0.5	0.2
Corriente eficaz ⁽²⁾	1	0.5	0.2
THD de voltaje ⁽²⁾	2.5	5	--
THD de corriente ⁽²⁾	2.5	5	--

Nota: datos obtenidos del presente estudio y catálogos técnicos

⁽¹⁾ Según la norma IEC 62053-21 o IEC 62053-22

⁽²⁾ Según la norma IEC 61557-12

En términos generales, los datos de la Tabla II revelan que las clases de medición del medidor desarrollado son en su mayoría inferiores a las de los otros dispositivos. Tal es así que la clase de precisión de la energía eléctrica activa se define en los rangos especiales de la norma IEC 62053-22. Se tiene una excepción en las clases relacionadas con la medición de armónicos, esto se debe al efecto de la reducción de outliers en la formación de la onda promedio.

Es relevante destacar que los equipos empleados para medir varios parámetros eléctricos, tanto los indicados en la TABLA II como en el resto de la información comercial consultada, indican cumplir con la norma IEC 61000-4-30.

CONCLUSIONES

- Se logró exitosamente diseñar e implementar un dispositivo electrónico de medición destinado al registro de parámetros eléctricos pertinentes a la tarificación y la calidad de la energía, así como evaluar los errores obtenidos en conformidad con las normativas IEC.
- La mayoría de los equipos similares al diseñado en este trabajo, incluidos aquellos que se detallan en la TABLA II, están concebidos para cumplir con la norma IEC 61000-4-30. Esta norma está orientada a analizadores de calidad de energía y establece un nivel de precisión superior en la captura y cálculo de datos, así como en los intervalos de análisis. Como consecuencia, es comprensible que estos dispositivos presenten una mejor clase de medición dentro de los marcos establecidos por las normas IEC 62053-21 y 61557-12 que son menos exigentes en comparación.

RECOMENDACIONES

El diseño actual podría ser optimizado mediante la adición de un filtro antialiasing y la inclusión de un circuito de alimentación en la placa para aprovechar la energía de la red bajo análisis.

En relación a las características del medidor, se sugiere explorar la viabilidad de desarrollar un medidor de energía destinado a la tarificación independiente de uno diseñado para la medición de variables de calidad energética. Esto potencialmente elevaría la clase de medición de cada uno.

Además, resulta esencial examinar diversos algoritmos de submuestreo que puedan mejorar la clase de medición de armónicos y su posterior análisis.

REFERENCIAS

- [1] Enel Distribución Perú S.A.A., "Memoria Anual Integrada 2022." Lima, Perú, 2022.
- [2] Instituto Nacional de Calidad, *Procedimiento para la verificación de medidores estáticos de energía eléctrica activa clase 0,2 s; 0,5 s; 1; 2 y medidores electromecánicos de energía eléctrica activa clase 2*, Perú, 2016.
- [3] N. E. Huiman, "Diseño e implementación de una red de medidores de energía para artefactos domésticos," B.S. thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima,

2018. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/11748>
- [4] Ministerio de Energía y Minas, "Guía de orientación para la selección de la tarifa eléctrica a usuarios finales en baja tensión," Lima, Jan. 2011.
- [5] E. O'Driscoll and G. E. O'Donnell, "Industrial power and energy metering – a state-of-the-art review," *J Clean Prod*, vol. 41, pp. 53–64, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.046>
- [6] K. Hakpyeong, et al., "A systematic review of the smart energy conservation system: From smart homes to sustainable smart cities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, 2021, doi: [10.1016/j.rser.2021.110755](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110755)
- [7] T. Khalifa, K. Naik, and A. Nayak, "A Survey of Communication Protocols for Automatic Meter Reading Applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 2, pp. 168–182, 2011, doi: [10.1109/SURV.2011.041110.00058](https://doi.org/10.1109/SURV.2011.041110.00058)
- [8] S. Roy, B. Bedanta, and S. Dawnee, "Advanced Metering Infrastructure for real time load management in a smart grid," in *2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE)*, 2015, pp. 104–108. doi: [10.1109/ICPACE.2015.7274926](https://doi.org/10.1109/ICPACE.2015.7274926).
- [9] A. Omिताomu and H. Niu, "Artificial Intelligence Techniques in Smart Grid: A Survey," *Smart Cities*, vol. 4, pp. 548–568, 2021.
- [10] A. Marin. "Seal beneficiará a más de 7 mil usuarios con medidores inteligentes en Arequipa." *Peruenergía*. Accessed Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://peruenergia.com.pe/seal-beneficiara-a-mas-de-7-mil-usuarios-con-medidores-inteligentes-en-arequipa/>
- [11] Enel. "Enel inició la instalación del segundo piloto de medidores inteligentes en Lima y Callao." *Enel Perú*. Accessed Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.enel.pe/es/conoce-enel/prensa/press/d202111-enel-inicio-la-instalacion-del-segundo-piloto-de-medidores-intel.html>
- [12] K. Ehrhardt-Martinez, K. Donnelly, and J. Laitner, "Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs: A Meta-Review for Household Electricity-Saving Opportunities," *American Council for an Energy Efficient Economy*, Washington, USA, Rep. E105, 2010.
- [13] S. Wilhelm and J. Kasbauer, "Exploiting Smart Meter Power Consumption Measurements for Human Activity Recognition (HAR) with a Motif-Detection-Based Non-Intrusive Load Monitoring (NILM) Approach," *Sensors*, vol. 21, no. 23, 2021, doi: [10.3390/s21238036](https://doi.org/10.3390/s21238036).
- [14] J. Driesen et al., "Development of a Measurement System for Power Quantities in Electrical Energy Distribution Systems," in *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Anchorage, AK, USA, 21-23 May 2002*, 2002, pp. 21–23.
- [15] R. Jaiswal, et al., "Anomaly Detection in Smart Meter Data for Preventing Potential Smart Grid Imbalance," in *Proceedings of the 2021 4th Artificial Intelligence and Cloud Computing Conference*, in AICCC '21. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022, pp. 150–159. doi: [10.1145/3508259.3508281](https://doi.org/10.1145/3508259.3508281).
- [16] S. C. Yip, et al., "Detection of energy theft and defective smart meters in smart grids using linear regression," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 91, pp. 230–240, Aug. 2017, doi: [10.1016/j.ijepes.2017.04.005](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.04.005)
- [17] International Electrotechnical Commission. "IEC 61557-12 Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. — Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures — Part 12: Performance measuring and monitoring devices (PMD)". Webstore, IEC. Accessed: Feb. 15, 2023. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/69019>

- [18] International Electrotechnical Commission. "IEC 62053-21 Electricity metering equipment – Particular requirements – Part 21: Static meters for AC active energy (classes 0,5, 1 and 2)." Webstore, IEC. Accessed: Feb. 15, 2023. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/28660>
- [19] Schneider Electric. "Medidor de montaje en panel PowerLogic ION7410 - pantalla puerto óptico y 2 pulsos," https://anyoelectric.com/mpw_file/varios/t_productos_hoja_tecnica_medidor_de_montaje_6220fe.pdf
- [20] ABB, "Medidores M1M 15, M1M 20 and M1M 30," https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/argentina/lelectrification/arabb-m1m_rev2020-11.pdf?sfvrsn=22e91c17_2
- [21] B. Wu, N. Tan, and X. Yu, "An Energy Metering Chip With a Flexible Computing Engine," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 46351–46362, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909435.
- [22] International Electrotechnical Commission. "IEC 61000 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods." Webstore, IEC. Accessed: Feb. 15, 2023. [Online]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/68642>
- [23] L. J. Muñoz, "Diseño de un medidor de consumo de energía eléctrica en redes industriales y domésticas, basado en la adquisición y digitalización de señales para el monitoreo y análisis de la calidad de energía," B.S. thesis, Universidad San Martín de Porres, Lima, 2014. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12727/3231>
- [24] J. A. Echeverri and J. L. Patiño, "Sistema Inteligente de monitoreo de consumo eléctrico (SIMCE)," Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2018. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11059/9426>
- [25] F. K. Handhal and A. T. Rashid, "A prototype Design for Three Phase Smart Energy Meter," in *2017 Second Al-Sadiq International Conference on Multidisciplinary in IT and Communication Science and Applications (AIC-MITCSA)*, 2017, pp. 262–267, doi: 10.1109/AIC-MITCSA.2017.8722989
- [26] C. Venugopal, T. Govender, and B. Thangavel, "Load Analysis and Energy Management for Residential System Using Smart Meter," in *2020 2nd International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE)*, 2020, pp. 1–8, doi: 10.1109/ICECIE50279.2020.9309554
- [27] Syafii, A. Luthfi, and A. Y. A. Rozzi, "Design of raspberry pi web-based energy monitoring system for residential electricity consumption," in *2020 International Conference on Information Technology Systems and Innovation, ICITSI 2020 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2020, pp. 192–196, doi: 10.1109/ICITSI50517.2020.9264926
- [28] N. Ashokkumar, V. Arun, S. Prabhu, V. Kalaimagal, D. Srinivasan, and B. Shanthi, "Design and Implementation of IoT based Energy Efficient Smart Metering System for Domestic Applications," in *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 2023, pp. 1208–1212, doi: 10.1109/ICACCS57279.2023.10113012
- [29] A. Othman and N. H. Zakaria, "Energy Meter based Wireless Monitoring System using BLYNK Application via smartphone," in *IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology, IICAET 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2020, doi: 10.1109/IICAET49801.2020.9257827
- [30] Mayur Pimple, Suraj Thopate, Avdhut Nikam, and Santosh Gadekar, "IoT Based Smart Energy Meter Using ESP 32," in *3rd International Conference on Communication and Information Processing (ICCIP-2021)*, 2021.
- [31] S. Yildiz and M. Burunkaya, "Web Based Smart Meter for General Purpose Smart Home Systems with ESP8266," in *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, 2019, pp. 1–6, doi: 10.1109/ISMSIT.2019.8932931
- [32] W. Hlaing, et al., "Implementation of WiFi-based single phase smart meter for Internet of Things (IoT)," in *2017 International Electrical Engineering Congress (IEECON)*, 2017, pp. 1–4, doi: 10.1109/IEECON.2017.8075793
- [33] M. Shaiful, "Smart home meter reading using IoT with BLYNK app," in *5th International Conference on Green Design and Manufacture (IconGDM 2019)*, 2019. doi: 10.1063/1.5118117
- [34] P. A. Chandra, et al., "Automated energy meter using WiFi enabled raspberry Pi," in *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2016, pp. 1992–1994. doi: 10.1109/RTEICT.2016.7808186
- [35] R. Sheeba et al., "Real-time Monitoring of Energy Meters Using Cloud Storage," in *2021 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON)*, 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/IPRECON52453.2021.9640636
- [36] A. R. Salunke and N. M. Gaurkar, "Robotized electric meter reading and monitoring system utilizing ZigBee-integrated Raspberry pi," in *2017 IEEE International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE)*, 2017, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICEICE.2017.8191928
- [37] G. Spasov, et al., "A Smart Solution for Electrical Power Monitoring Based on MCP39F501 Sensor," in *2019 XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET)*, Sozopol, Bulgaria, 2019, doi: 10.1109/ET.2019.8878502
- [38] T. Shahzad Gill, et al., "IoT Based Smart Power Quality Monitoring and Electricity Theft Detection System," in *2021 16th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICET54505.2021.9689908
- [39] H. Nyquist, "Certain Topics in Telegraph Transmission Theory," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 47, no. 2, pp. 617–644, 1928, doi: 10.1109/T-AIEE.1928.5055024
- [40] H. Lev-Ari, A. M. Stankovic, and S. Lin, "Application of staggered undersampling to power quality monitoring," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 3, pp. 864–869, 2000, doi: 10.1109/61.871345
- [41] J. W. Cooley and J. W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series," *Math Comput*, vol. 19, no. 90, pp. 297–301, 1965, doi: 10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1